Müller-Lenhartz

Der Kreislauf des
Stickstoffes.

Der Kreislauf des Stickstoffes

Von

Hofrat Dr. Müller-Lenhartz,
Administrator am Landwirtschaftlichen Institut der Universität Leipzig

Hannover 1917.
Verlag von M. & H. Schaper.

Der Kreislauf des Stickstoffes

Von

Hofrat Dr. Müller-Lenhartz,

Administrator am Landwirtschaftlichen Institut der Universität Leipzig

Hannover 1917.

Verlag von M. & H. Schaper.

Druck von Aug. Eberlein & Co., Hannover.

Der Kreislauf des Stickstoffes.

Alles Werden und Vergehen der Weltkörper und des organischen Lebens auf ihnen besteht in einem beständigen Kreislaufe der Energieformen und deren Träger, der Materie. Auch für letztere besteht ein ähnliches Gesetz wie dasjenige von der Erhaltung der Energie. Die Materie kann ebensowenig wie die Energie verloren gehen oder gewonnen werden, wohl aber kann sie in verschiedenen Formen auftreten, in denen ihr Wirkungswert ein sehr verschiedener ist. Einleitung

Die Frage, ob diejenigen Elemente, welche den Inbegriff des organischen Lebens ausmachen, auch in hinreichender Menge vorhanden sind, besteht also darin, ob diese stets in genügenden Mengen in solchen geeigneten Verbindungsformen vorkommen, um an dem ununterbrochenen Kreislaufe des Lebens teilnehmen zu können. Diese Frage ist für den Stickstoff von ganz besonderer Bedeutung.

Wenn bei der Betrachtung des physiologischen Wertes der Elemente für die Pflanzenernährung gesagt wird, daß dem Stickstoffe eine besondere Bedeutung insofern zukommt, als erwiesenermaßen die von ihm im Boden in aufnehmbarer Form befindliche Menge für das Wachstum der Pflanzen maßgebend ist, so bedeutet diese an sich selbstverständliche Tatsache noch keinen Vorzug, denn gleichwie für die Ernährung des tierischen Organismus ein bestimmtes Verhältnis zwischen stickstofffreier und stickstoffhaltiger Nahrung erforderlich ist, so darf man wohl annehmen, daß auch für die Ernährung des Pflanzenkörpers ein ähnliches Verhältnis vorgesehen ist. Die stickstofffreie Kohlenstoffverbindung, welche die Pflanze aufzunehmen vermag, die Kohlensäure, steht ihr aber stets in reichlicher Menge, die assimilierbare Stickstoffverbindung dagegen nur in sehr begrenzter Menge zur Verfügung, und es muß daher nur selbstverständlich erscheinen, daß die verfügbare Menge der assimilierbaren Stickstoffverbindung für das Wachstum der Pflanze maßgebend ist.

Die stickstofffreien Kohlenstoffverbindungen sind die hauptsächlichsten Träger der Energie, ohne welche kein Leben denkbar ist. Aus Stickstoff im Verbande mit anderen Elementen aber bauen sich die Eiweißkörper auf, welche die hauptsächlichsten Bestandteile des Protoplasmas bilden, an welches die wichtigsten Funktionen der lebenden Organismen geknüpft sind. Stickstoff und Kohlenstoff in ihren entsprechenden Verbindungen sind daher im allgemeinen für die Erhaltung und den Aufbau des lebenden Organismus als vollkommen gleichwertig zu erachten. Die überwiegende Bedeutung des Stickstoffes, oder richtiger gesagt, der Stickstofffrage, ist durch äußerliche Verhältnisse bedingt, die in der Art des Pflanzenwachstums ihre Begründung haben.

Eine Betrachtung des Kreislaufes des Stickstoffes in der organischen Welt beginnt naturgemäß mit der Pflanze, welche ihren Nahrungsbedarf ausschließlich in Form anorganischer Verbindungen aufnimmt und daher den Anfang alles Lebens bildet.

Die Pflanzenwelt könnte sehr wohl auch ohne tierisches Leben für sich bestehen und den Kreislauf der für sie wesentlichen Stoffe innerhalb eines engeren Rahmens beendigen, sofern man die Bakterien, wie üblich, als der Pflanzenwelt zugehörig betrachtet.

Ein tierisches Leben aber ist ohne ein gleichzeitiges Pflanzenleben undenkbar, und letzteres mußte daher erst zur vollsten Entwickelung gelangt sein, bevor an eine Entstehung des tierischen Lebens zu denken war.

Die Pflanze lebt, wie gesagt, nur von unorganischer Substanz, die sie dem Erdboden und der Atmosphäre entnimmt, und unter den hierfür in Frage kommenden Körpern sind zwei von besonderer Bedeutung, nämlich Kohlensäure und Salpetersäure, deren Bestandteile nebst denen des Wassers zum Aufbau des Pflanzenkörpers zunächst erforderlich sind.

Das Wasser, welches auf und in der Erde und als Wasserdampf in der Luft in unerschöpflicher Menge vorhanden ist, kann außerhalb der Betrachtung bleiben, ebenso wie die übrigen Pflanzennährstoffe, die in reichlicher Menge in jedem Boden enthalten sind, oder leicht herbeigeschafft werden können.

Den Bedarf an Kohlenstoff entnimmt die Pflanze ausschließlich in Form von Kohlensäure der Atmosphäre, und wenn die Menge dieser auch nur einen geringen Bruchteil, etwa 0,04 v. H. der gesamten Luft ausmacht, so ist sie doch, absolut genommen, eine ungeheure. Zudem wird Kohlensäure

durch jeden Verbrennungsprozeß neu erzeugt, und auch die von der Pflanze gebildeten organischen Kohlenstoffverbindungen werden schließlich durch Verwesung oder durch den Lebensprozeß der Tierwelt der Luft zumeist wieder als Kohlensäure zugeführt. Infolge der Zirkulation der Luft ist aber die gesamte Kohlensäuremenge über die ganze Erdoberfläche gleichmäßig verteilt, so daß in dieser Hinsicht keine Gegend einen Vorzug vor der anderen hat. Die Kohlensäure steht der Pflanze also stets und überall in vollem Maße zur Verfügung, und die Möglichkeit eines Mangels an ihr ist ohne weiteres ausgeschlossen.

Wesentlich anders aber liegen die Verhältnisse für die Salpetersäure, die einzige Verbindungsform, in welcher der Pflanze der Stickstoff zugänglich ist und die von ihr lediglich dem Boden entnommen werden kann.†) Der Gehalt des Bodens an dieser Säure bezw. an salpetersauren Salzen ist indessen ein beschränkter und sehr ungleichmäßiger, und es ist keineswegs gesagt, daß bei den jetzigen Kulturzuständen der ganze Stickstoff, welcher von der Pflanze verarbeitet worden ist, zuletzt auch wieder in assimilierbarer Form dem Boden zurückgegeben wird.

Der elementare Stickstoff, der fast $^4/_5$, genauer 79 Volumenprozent der gesamten Atmosphäre ausmacht, ist den Pflanzen nicht, oder doch nur in beschränktem Maße unter der Mitwirkung von Bakterien in den Wurzelknöllchen der Leguminosen zugänglich, und normale selbsttätige Oxydationsvorgänge, durch welche der freie Stickstoff, ähnlich der Bildung der Kohlensäure, in Salpetersäure übergeführt werden könnte, gibt es nicht, mit Ausnahme desjenigen durch die elektrische Entladung beim Gewitter. Indessen ist die Menge der hierdurch gewonnenen Säure so gering, daß sie als wesentlicher Faktor nicht in Betracht kommen kann. Es ist daher die Möglichkeit eines Mangels an assimilierbarem Stickstoff wohl in Erwägung zu ziehen, und hierin eben liegt die vorwiegende Bedeutung des Stickstoffes oder der Stickstofffrage.

Der Stickstoffkreislauf und die Physiologie der Ernährungsvorgänge im Tier- und Pflanzenreich

Rein theoretisch betrachtet würde ja der Kreislauf des Stickstoffes ein ununterbrochener sein, d. h. es würde dieses Element stets in unverminderter Menge in assimilierbarer Form dem Boden, dem es entnommen wurde, wieder zurück-

†) Hieran, sagt V o g e l (Jahresber. d. Vereinig. f. angew. Botanik IX, S. 192), ändert auch die sicher erwiesene direkte Aufnahmefähigkeit des Ammoniakstickstoffes durch die Pflanzenwurzeln nichts, da unter den gewöhnlich obwaltenden Verhältnissen eine Nitrifikation dieser Stickstoffform stattfinden wird.

gegeben werden, aber in Wirklichkeit stellen sich Verhältnisse ein, durch die Verluste unvermeidlich erscheinen.

Die physiologischen Vorgänge beim Aufbau der stickstoffhaltigen Verbindungen im Pflanzenkörper sind noch fast gänzlich unbekannt. Ihre Kenntnis ist aber auch belanglos im Hinblick auf die Frage, ob und welche Verluste während des Kreislaufes des Stickstoffes stattfinden. Es genügt die Tatsache, daß als Endprodukt der Stickstoffverarbeitung im Pflanzenkörper neben einfacher zusammengesetzten Amidoverbindungen Eiweißkörper entstehen, welche, soweit sie nicht mit den Pflanzenresten im Boden verbleiben oder als Streu und auf sonstige Weise dem Boden direkt wieder zugeführt werden, Mensch und Tier zunächst als Nahrung dienen. Wie sich nun auch der Organismus des Menschen von dem der Tiere, und derjenige der Tiere unter sich unterscheidet, der Verdauungsvorgang ist im allgemeinen und in seinem Endergebnis doch stets derselbe. Das noch im Wachstum begriffene Individuum verbraucht einen Teil der stickstoffhaltigen Materie zum Aufbau seiner Körpersubstanz, und dieser Anteil bleibt während der ganzen Lebensdauer an dieser Stelle festgebannt, um erst nach dem Tode den weiteren Kreislauf zu vollenden. Der übrige Teil der Stickstoffnahrung nimmt ebenso wie bei dem ausgewachsenen Individuum seinen gewöhnlichen Lauf. Ein kleinerer Rest der unverdauten Nahrung, vermischt mit Verdauungsprodukten und den Resten der Verdauungssekrete, verläßt als Kot die Verdauungswege; die Hauptmenge der stickstoffhaltigen Stoffwechselprodukte aber wird in dem Harn, beim Menschen und den Karnivoren als Harnstoff und Harnsäure, bei den reinen Pflanzenfressern als Harnstoff und Hippursäure ausgeschieden. Daß hierbei keine Verluste eintreten, ergibt sich auch aus der Stickstoffbilanz bei Fütterungsversuchen zur Genüge. Allerdings kommt im Schweiße auch Harnstoff vor, aber einerseits ist seine Menge im allgemeinen sehr gering, und andererseits muß man unter normalen, d. h. ursprünglichen Verhältnissen annehmen, daß auch diese geringen Stickstoffmengen dem Kreislaufe erhalten bleiben.

Alle Ausscheidungen und mit ihnen die darin enthaltenen Stickstoffverbindungen, ebenso die Körpersubstanz der abgestorbenen Individuen, werden unter normalen Verhältnissen dem Erdboden zurückgegeben, aber nicht als Nahrung für die eigentliche, die grünende Pflanzenwelt, welche von der organischen Substanz gar keinen Gebrauch machen könnte, sondern als Lebensunterhalt für die Angehörigen einer dritten großen Gruppe von Lebewesen, die Mikroorganismen.

Die Mikroorganismen leben im allgemeinen, ebenso wie die Angehörigen des Tierreiches, von organischer Substanz, sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ernährungsweise von letzteren aber dadurch, daß sie ihren Bedarf an Stickstoff nicht durchweg in Form der hochmolekularen Eiweißkörper verlangen, sondern vorwiegend mit den schon weiter vorgeschrittenen Abbauprodukten desselben bis herab zu den einfachsten Amidoverbindungen, ja teilweise mit Ammoniaksalzen, selbst atmosphärischem Stickstoff zufrieden sind.

Selbstverständlich ist nicht anzunehmen, daß die Angehörigen einer Bakterienart die verschiedensten Funktionen zugleich verrichten, d. h. von allen möglichen Arten von Stickstoffverbindungen leben und als Stoffwechselprodukt Ammoniak bilden. Im Gegenteil findet ein Ineinanderarbeiten und eine weitgehende Arbeitsteilung in der Weise statt, daß die Stoffwechselprodukte einer Bakterienart und ihre abgestorbenen Körper anderen Arten als Nährstoff dienen und von diesen weiter in einfachere Stickstoffverbindungen übergeführt werden. Welcher Anteil an dieser Arbeit den einzelnen Bakterienarten zukommt, ist zwar nicht bekannt, denn entsprechend der ungeheuren Mannigfaltigkeit der Stickstoffverbindungen, vom Eiweiß und seinen Spaltungsprodukten herab bis zum einfachen Ammoniak, wird auch die Anzahl der verschiedenen Bakterienarten eine überaus große sein, und nur für verhältnismäßig wenige Arten von Mikroorganismen sind die Lebensbedingungen und ihre Lebensäußerungen hinlänglich bekannt, um sich ein Bild von den Zersetzungsvorgängen der organischen stickstoffhaltigen Materie machen zu können. Eingehender studiert sind hinsichtlich ihrer Zersetzung durch Mikroorganismen nur die im Harn vorkommenden einfachen Eiweiß-Abbauprodukte, der Harnstoff, die Harnsäure und die Hippursäure durch van Tieghem[1]), später von Leube[2]) und von v. Jaksch[3]), sowie in neuerer Zeit besonders von Beyerinck[4]). Die Anzahl der Bakterienarten, welche für die Zersetzung besonders des Harnstoffes in Frage kommen, ist eine sehr große. Beteiligt sind daran†) teils sporenfreie

[1]) Compt. rend. 58, 1864, S. 210.

[2]) Zeitschrift für klinische Medizin 3, 1881, S. 238.

[3]) Zeitschrift für physiologische Chemie 5, 1881, S. 395.

[4]) Zentralblatt für Bakteriologie, II. Abt., 7, 1901, S. 33.

†) Nach neuesten Forschungen von Piekarski (Inaug.-Dissert. Leipzig 1917) tritt als Erreger der spontanen Harngärung im Rinderharn für gewöhnlich der Micrococcus ureae Cohn auf.

Löhnis[5]) Bacterium ureae und Urobacillus Miquelii Beyek zu zählen sind, sowie Koli- und Fluoreszensarten u. a. m., teils sporenbildende und selbst Schimmelpilze, welche sich alle durch die Schnelligkeit der Ammoniakbildung und Formenverschiedenheiten unterscheiden, aber darin übereinstimmen, daß sie den vorhandenen Harnstoff völlig in Mikroorganismen, besonders Proteusarten, zu denen nach Ammoniak überführen. Während somit über die Beteiligung besonderer Bakterienarten an der Ammoniakbildung aus den Harnbestandteilen durch die erwähnten Arbeiten ziemliche Klarheit geschaffen wurde, scheinen die Ansichten über den inneren Vorgang der Ammoniakbildung noch weit auseinander zu gehen. So wurde schon von Musculus[6]) in schleimhaltigem Harn ein Ferment nachgewiesen, welches den Harnstoff in kohlensaures Ammonium überführte, hingegen auf Harnsäure, Hippursäure und die sonstigen im Harn vorkommenden stickstoffhaltigen Verbindungen keinerlei Wirkung äußerte, und es scheint dabei die Annahme bestanden zu haben, daß besagtes Ferment von vornherein mit dem Harn ausgeschieden und die Ammoniakbildung demnach ohne Mitwirkung von Bakterien zustande gekommen sei. Auch Pasteur und Joubert[7]) konnten die Gegenwart eines ammoniakbildenden Fermentes im Harn feststellen, indessen betrachteten diese es als ein Ausscheidungsprodukt der im Harn vorkommenden Bakterien, während nach Beyerincks neueren Untersuchungen[8]) bei einigen der in Betracht kommenden Bakterien überhaupt kein Enzym nachweisbar, bei anderen Arten dagegen ein solches wohl vorhanden ist, aber nur als inneres Ferment (Urease) wirksam sein soll. In Anbetracht alles dessen, was über die Ernährungsvorgänge und den Stoffwechsel lebender Organismen bekannt ist, dürfte die letztere Auffassung die größere Wahrscheinlichkeit für sich haben, denn es ist wohl anzunehmen, daß auch die Mikroorganismen zunächst Enzyme bilden, durch welche die ihnen passende Nahrung in assimilationsfähige Form gebracht wird.

Für die Beurteilung des Endergebnisses aber dürfte diese Frage, durch welche die in Rede stehenden Vorgänge noch verwickelter werden, ohne Bedeutung sein. Während der Harnstoff ohne weiteres in Ammoniak übergeführt wird, soll die

---

[5]) Zentralblatt für Bakteriologie, II. Abt., 1905, S. 720.

[6]) Compt. rend. 82, 1876, S. 333.

[7]) Compt. rend. 83, 1876, S. 7.

[8]) Zentralblatt für Bakteriologie, II. Abt., 7, 1901, S. 55.

Harnsäure durch die hierfür in Frage kommenden Mikroorganismen nach Lex[9]) erst in Harnstoff umgewandelt werden, welch letzterer dann durch die besonderen Harnstoffbakterien weiter umgeformt wird. Auch die Hippursäure, bei deren Zersetzung unter anderen auch der Bacillus prodigiosus beteiligt ist, wird zunächst in Benzoesäure und Aminoessigsäure gespalten, von denen aber letztere sogleich durch dieselben Bakterienarten zu Ammoniak reduziert wird. Von anderen der in Rede stehenden Mikroorganismen wird angegeben, daß sie sowohl Harnstoff wie auch Hippursäure oder Hippursäure und Harnsäure zugleich zu Ammoniak verarbeiten können.

Für die übrigen stickstoffhaltigen Bestandteile des Harnes, das Guanidin, Kreatinin usw., sind besondere Untersuchungen nicht bekannt, doch darf man sicher annehmen, daß auch diese durch besondere Bakterienarten, wenn nicht unmittelbar, so doch auf dem Umwege über den Harnstoff in Ammoniak übergeführt werden. Die Umwandlung des Harnstoffes in Ammoniak geht aber nach Löhnis[10]) quantitativ vor sich, wenn nur hinreichend kräftige Ammoniakbildner zugegen sind, und somit würden die stickstoffhaltigen Bestandteile des Harnes von Mensch und Tier ohne Verlust zunächst als Ammoniak in den Boden übergehen.†)

Bedeutend verwickelter gestalten sich die Verhältnisse indessen bei der Zersetzung der festen Exkremente, welche aus unverdauten Resten der Nahrung und Verdauungssekreten, d. h. also, soweit die stickstoffhaltigen Bestandteile in Frage kommen, im wesentlichen aus unverändertem Eiweiß bestehen. Annähernd die Hälfte dieser gesamten Stickstoffsubstanz entfällt aber auf das Eiweiß der Bakterienleiber[11]), welche bereits im Darm der Tiere angesiedelt sind und daselbst die Zersetzung des Darminhaltes einleiten. Das Eiweiß aller Mikroorganismen besteht aber zum großen Teil aus Nuklein-

---

[9]) Zentralblatt f. d. medizinischen Wissenschaften 10, 1872, S. 513.

[10]) Löhnis, Zentralblatt f. Bakt., II Abt., 1905, S. 680.

[11]) Löhnis, Handbuch der landw. Bakteriologie 1910, S. 464.

†) Nach neueren Forschungen von Vogel (Bericht über die in den Kriegsjahren 1915/16 auf Veranlassung des ständigen Ausschusses des Landeskulturrates für das Königreich Sachsen pp. ausgeführten Versuchen über .... Jauche, S. 84), verläuft diese Umwandlung nicht restlos, sondern es finden sich in monatelang lagernder Jauche höchstens 90 v. H. des Harnstickstoffs als Ammoniakstickstoff vor.

verbindungen, wie zuerst Kossel[12]) für die Hefe nachwies, in der er die Hefenukleinsäure feststellte. Galeotti[13]) fand in Bakterien Nukleoproteide, und nach Stutzer[14]) entfallen bei Schimmelpilzen 40,75 % des gesamten Stickstoffes auf Nukleinstickstoff. Ein beträchtlicher Anteil des Stickstoffes der Exkremente besteht also aus Nukleinverbindungen, welche der zersetzenden Tätigkeit der Mikroorganismen ebenso schwer zugänglich sind, wie den Verdauungsfermenten des tierischen Organismus. Zahlreiche Forscher haben sich mit dem Studium der Eiweißfäulnis befaßt und eine große Anzahl von Darmbakterien ist festgestellt worden, welche an der Eiweißzersetzung beteiligt sind, aber es würde unmöglich sein, im einzelnen für bestimmte Bakterienarten anzugeben, wie und in welchem Maße diese an der vorbereitenden Zersetzung der verschiedenen Eiweißkörper beteiligt sind. Das aber ist festgestellt worden, daß die Bakterien das Eiweiß in derselben Weise spalten, wie es durch die Einwirkung des Pepsin- und des Trypsinfermentes oder durch siedende Säuren der Fall ist. Es bilden sich zunächst durch die verflüssigenden Bakterien Albumosen und Peptone, welche sodann in die primären Spaltungsprodukte, die Aminosäuren zerlegt werden. Diese primären Spaltungsprodukte, welche sämtlich aus Aminosäuren bestehen, sind aber nach den Untersuchungen von Czapek[15]) sowie nach Emmerling[16]) gerade die besten Nährstoffe für die Mehrzahl aller Bakterien.

Der weitere Abbau der Aminosäuren kann auf verschiedene Weise vor sich gehen, und zwar so, daß entweder unter sofortiger Abspaltung von Ammoniak die einfachen Säuren, wie Essig-Kapronsäure usw. entstehen, oder aber auf die Weise, daß die Karboxylgruppe der Aminosäuren abgespalten wird, wodurch die Amidoverbindungen der entsprechenden Kohlenwasserstoffe, Methylamin usw. frei werden. Nach diesem Vorgange würde aus dem Lysin das Kadaverin oder Pentamethylendiamin, und aus dem Ornithin des Argimins das Putrescin oder Tetramethylendiamin, die charakteristischen Produkte der Eiweißfäulnis, entstehen.[17])

---

[12]) Zeitschrift f. physiol. Chemie 3, 1879, S. 284.
[13]) Zeitschrift f. physiol. Chemie 25, 1898, S. 48.
[14]) Zeitschrift f. physiol. Chemie 6, 1882, S. 572.
[15]) Hofmeisters Beiträge I 538, II 557, III 47 — 1902.
[16]) Berichte der Deutsch. chem. Gesellsch. 35 II, 1902, S. 2289.
[17]) Cohnheim, Chemie der Eiweißkörper 1904, S. 53.

Es können indessen auch beide Vorgänge zugleich stattfinden, so daß z. B. aus den Aminosäuren unter Abspaltung von Ammoniak und Kohlensäure die einfachen Kohlenwasserstoffe entstehen würden.

Von dem Eiweiß bis zu dessen einfachen Spaltungsprodukten, den Aminosäuren, ist aber ein langer Weg, und entsprechend der großen Anzahl von Verbindungen, welche bei dem stufenweisen Abbau der Eiweißkörper entstehen, ist auch die Anzahl der dabei beteiligten Bakterienarten eine sehr große. Die hierbei in Frage kommenden Mikroorganismen dürften wohl vorwiegend Anaeroben sein, wenigstens ist festgestellt worden, daß die Stickstoffverbindungen der festen Exkremente, so lange sie über der Erde dem Luftzutritt ausgesetzt sind, nur zu einem geringen Teil in Ammoniak verwandelt werden.

So wurde nach den Untersuchungen von Jentys[18]) von dem Stickstoff der festen Exkremente in einem Monat bei unbehindertem Luftzutritt nur 1 v. H., in einer sauerstoffreien Atmosphäre dagegen 11 v. H. in Ammoniak verwandelt, und ähnliche Versuche von Dietzell[19]) ergaben, daß in einem Gemisch von Kot und Stroh innerhalb 6 Monaten bei Luftzutritt etwa 3 v. H., bei Luftabschluß aber 20 v. H. des vorhandenen Stickstoffes in Ammoniak übergeführt wurden.

Die schwere Zersetzlichkeit der Stickstoffverbindungen der festen Exkremente dürfte nicht allein auf die Gegenwart namhafterer Mengen der schwer zersetzlichen Nukleinverbindungen zurückzuführen sein. Es sprechen dabei wohl noch verschiedene andere Faktoren mit, insbesondere der geringe Wassergehalt und die dadurch bedingte höhere Konzentration der gelösten Bakteriennährstoffe und, was auf die Lebenstätigkeit der Mikroorganismen noch ungünstiger wirkt, die Anhäufung ihrer Stoffwechselprodukte in den Lösungen.

Bedeutend günstiger als auf der Oberfläche wird die Zersetzung unter natürlichen Verhältnissen im Boden verlaufen, wo die die weitere Lebenstätigkeit der Bakterien ungünstig beeinflussenden eigenen Zersetzungsprodukte alsbald durch Regenwasser verdünnt und in tiefere Bodenschichten fortgeschafft werden können.

Daß aus den Stickstoffverbindungen, besonders den Amiden, unter geeigneten Versuchsbedingungen auch Stickstoff in elementarer Form entbunden werden kann, ist verschiedent-

---

18) Anzeiger d. Akademie d. Wissenschaften, Krakau, 1892, S. 194.
19) Landw. Versuchsstation 48, 1897, S. 163.

lich nachgewiesen, und daß diese Entbindung ebenfalls zum Teil auf Mikroorganismentätigkeit zurückzuführen ist, zeigten die vergleichenden Versuche von Dehérain[20]) mit vorher sterilisierten Stallmistproben und solchen im unveränderten Zustande, bei denen nur im letzteren Falle ein Verlust an elementarem Stickstoff bis zu 19 v. H. nachgewiesen werden konnte. Ob diese Bakterienwirkung aber eine physiologische ist, oder ob mittelbar durch eine Selbsterhitzung der gärenden Masse die stickstoffhaltige Substanz der letzteren unter Entbindung elementaren Stickstoffes verbrennen kann, muß dahingestellt bleiben. Tatsache ist, daß ein Verlust an elementarem Stickstoff, wo ein solcher festzustellen war, stets bei ungehindertem Luftzutritt und bei Gegenwart aërober Bakterien stattfindet. Beweiskräftig sind die in dieser Richtung angestellten Versuche indessen keineswegs, und ein abschließendes Urteil über die Frage, ob ein Verlust an Stickstoff wirklich unter natürlichen Verhältnissen stattfindet, kann daher noch nicht abgegeben werden. Daß Stickstoff auch ohne Zutun der Bakterien aus Ammoniakverbindungen in elementarer Form in Freiheit gesetzt werden kann, unterliegt keinem Zweifel. Salpetrigsaures Ammon, welches neben freiem Stickstoff nach Berthelot[21]) durch Einwirkung von trockenem Ammoniakgas auf Stickoxyd und Sauerstoff entsteht, aber auch bei der Zersetzung stickstoffhaltiger organischer Verbindungen durch Bakterien erhalten wird, zerfällt bekanntlich beim Erhitzen seiner Lösung glatt in Stickstoff und Wasser.

Es ist aber auch bekannt, daß viele Produkte pflanzlichen Ursprunges, wie Heu u. dergl., unter bestimmten Bedingungen sich sehr stark, selbst bis zur Entzündung erhitzen können, und solche Erhitzung findet in lagernden Düngerhaufen unter dem Einfluß von Mikroorganismen regelmäßig statt. Nach Gayon[22]) soll bei reichlichem Luftzutritt die Temperatur bis auf 74° steigen und nach Löhnis[23]) kommt es zuweilen in locker lagerndem, trockenem Schafdünger zu richtiger Verkohlung und Aschebildung, wie bei stark erhitztem Heu.

Es sind daher in den in Zersetzung begriffenen Düngerhaufen sehr wohl die Bedingungen gegeben, unter denen eine Entbindung von elementarem Stickstoff aus Ammoniak-

[20]) Compt. rend. 127, 1898, S. 471.

[21]) Bull. soc. chim. (2), 21, S. 55.

[22]) Compt. rend. 98, S. 528.

[23]) Handbuch der landw. Bakt. 1910, S. 452.

verbindungen stattfinden kann. Die Mitwirkung von Mikroorganismen bei solcher Entbindung des Stickstoffes wäre aber immer nur eine mittelbare durch die Erzeugung entsprechend hoher Hitzegrade, die sich durch geeignete Maßnahmen vermeiden lassen würden. Auf die Größe der durch die geschilderten Verhältnisse verlorenen Stickstoffmengen und auf die Mittel zur Verhütung namhafterer Verluste beim Lagern des Düngers wird noch zurückzukommen sein.

Mit Ausnahme derjenigen Stickstoffmengen, deren Verlust auch bei sorgfältigster Behandlung des Düngers unvermeidlich ist, geht die stickstoffhaltige organische Materie in Ammoniak oder Ammonsalze über und gelangt in dieser Form in den Boden, soweit nicht der Abbau der Stickstoffverbindungen schon im Boden selbst vor sich geht. Das Ammoniak und dessen Salze werden schließlich im Boden bei hinreichendem Luftzutritt vollkommen mineralisiert und zu salpetriger bezw. Salpetersäure oxydiert. Daß diese Oxydation zum Teil wenigstens schon durch den Sauerstoff der Luft auf rein chemischem Wege bewirkt wird, oder werden kann, ist kaum zu bezweifeln, denn wie Baumert zuerst nachgewiesen hat, wird Ammoniak ohne weiteres durch Ozon zu salpetrigsaurem Ammon oxydiert, und zwar nach Carius[24]) unter gleichzeitiger Bildung von Wasserstoffsuperoxyd, welch letzteres das salpetrigsaure Ammon nun zu salpetersaurem Salz weiter oxydiert.

Früher schon hatte Wöhler[25]) die Bildung von salpetrigsaurem Ammon aus Ammoniak und Wasserstoffsuperoxyd beobachtet, und Goppelsroeder[26]) machte auf die Wichtigkeit dieser Prozesse für die Bildung der salpetrigsauren und salpetersauren Salze in der Natur aufmerksam, ja Carius erblickt geradezu in ihnen die Hauptquelle für die Entstehung dieser Salze in der Natur.

Wenngleich somit an der Möglichkeit einer Nitrifikation des Ammoniaks durch den ozonisierten Sauerstoff der Luft nicht zu zweifeln ist, und ohne Frage wohl auch geringere Mengen von Salpetersäure auf diese Weise entstehen, so ist dieser Vorgang doch keineswegs die Hauptquelle für die Entstehung der Salpetersäure, sondern es muß auch die Oxydation des Ammoniaks, wie sich herausgestellt hat, im wesentlichen ebenfalls auf eine Bakterientätigkeit zurückgeführt werden. Nach vielen vergeblichen Versuchen, die für die Nitrifikation

---

[24]) Ann. Chem. u. Pharm. 174, S. 31.

[25]) Ann. Chem. u. Pharm. 136, S. 256.

[26]) Journ. prakt. Chemie (2) 4, S. 139.

des Ammoniaks in Betracht kommenden Mikroorganismen zu isolieren, gelang es endlich Winogradsky[27]), sie zu kultivieren und ihre prototrophe Lebensweise nachzuweisen. Die Züchtung der Salpeterbakterien aus Ackererde gelingt nicht auf den gewöhnlichen Nährböden, sondern lediglich in Lösungen von Mineralsalzen, deren Gehalt an Ammonsalz die einzige Stickstoffquelle darbietet. Die hier in Rede stehenden Bakterienarten (Nitrosococcus und Nitrosomonas) bilden indessen nicht Salpetersäure, sondern salpetrige Säure, während die weitere Oxydation der letzteren Säure zu Salpetersäure durch andere ebenfalls völlig prototrophe Mikroorganismen, die Nitratbakterien (Nitrobakter) bewirkt wird. Die Nitrit- und die Nitratbakterien, welche immer gemeinsam vorkommen, wachsen nur aërob, bedürfen aber des Lichtes nicht, trotzdem sie ihren Kohlenstoffbedarf dem Kohlensäuregehalt der Luft entnehmen, wie Godlewski[28]) bewiesen hat.

Die Lebensweise dieser Bakterien entspricht also schon völlig derjenigen der Pflanzen, denn Kohlensäure, Ammoniak bezw. salpetrige Säure nebst den erforderlichen Mineralsalzen bilden das Material für den Aufbau der Körpersubstanz dieser Mikroorganismen, aber es fehlt ihnen das Chlorophyll, und als Energiequelle kommt nur der Wärmewert des Ammoniaks in Betracht.

Die zuweilen an der Oberfläche lagernder Düngerhaufen beobachtete geringe Nitratbildung hat Veranlassung gegeben, diese auch auf Kosten der Nitratbakterien zu setzen und daraus die Schlußfolgerung zu ziehen, daß die prototrophe Lebensweise dieser Bakterien doch keine so ausgesprochene sei. Solche Auffassung vertritt unter anderen auch Löhnis[29]), welcher zu der Schlußfolgerung gelangt, daß vorhandene organische Substanzen keineswegs so störend auf die Lebenstätigkeit der Nitratbakterien einwirken, wie es auf Grund der Angaben von Winogradsky häufig noch angenommen werde. Diese Auffassung erscheint in keiner Weise begründet. Die geringe Nitratbildung an der Oberfläche eines feuchten, der Sonnenwärme ausgesetzten Düngerhaufens, an dem die

---

[27]) Zur Mikrobiologie des Nitrifikationsprozesses, Zentralbl. für Bakt., 2. Abt., II, 1896.

[28]) Zur Kenntnis der Nitrifikation, Anzeiger der Akademie und Wissenschaften in Krakau, Dezember 1892. Referat: Zentralbl. f. Bakt. XIII, 1893, S. 559 und desgleichen, 2. Abt., II, S. 458.

[29]) l. c., S. 474.

Bedingungen für eine Ozonbildung ganz besonders gegeben sind, erklärt sich sehr leicht und ungezwungen hieraus und unter Berücksichtigung der bereits erwähnten Tatsache, daß Ammoniak unter der Einwirkung von Ozon sehr leicht zu salpetrigsaurem bezw. salpetersaurem Ammon oxydiert wird.

Die von Löhnis ausgesprochene weitere Ansicht, daß freies Ammoniak scheinbar viel nachteiliger auf die Nitratbakterien wirke, als organische Verbindungen, erklärt sich ebenfalls sehr einfach aus den bereits erwähnten Versuchsergebnissen von Godlewski (l. c.), wonach für die in Rede stehenden Bakterien als einzige Kohlenstoffquelle die freie Kohlensäure in Betracht kommt, die aber naturgemäß bei Gegenwart von freiem Ammoniak sofort gebunden würde, wodurch natürlich die betreffenden Mikroorganismen ihrer Kohlenstoffquelle und damit ihrer Daseinsbedingungen beraubt sein würden, während bei Gegenwart organischer, vielleicht gar unlöslicher und daher unschädlicher Stickstoffverbindungen an dem Gehalt der Luft an Kohlensäure nichts geändert ist, und geringe Mengen etwa vorhandener Ammoniaksalze immer noch zur Erhaltung dieser Mikroorganismen ausreichend sein könnten.

Es berechtigt daher nichts, auf Grund der erwähnten Erscheinungen die völlig prototrophe Lebensweise der Nitrit- und Nitratbakterien in Zweifel zu ziehen. Diese Mikroorganismen nehmen ohne Zweifel die äußerste Stelle in der Reihe der für den Kreislauf des Stickstoffes in Betracht kommenden Bakterien ein und gleichen hinsichtlich ihrer Lebensbedingungen schon durchaus den Pflanzen, wie auch der stufenweise Abbau der Stickstoffsubstanzen bis zur völligen Mineralisierung durch diese Bakterien damit sein Ende erreicht hat. Der Stickstoff ist danach wieder in diejenige Verbindungsform übergeführt, in welcher er der Pflanze als Nahrung zugänglich ist.

Die Entbindung von elementarem Stickstoff und die dadurch bedingten Stickstoffverluste

Aber nicht die gesamte auf solche Weise wieder hergestellte Salpetersäure steht der Pflanze auch wirklich zur Verfügung, denn abgesehen davon, daß aus Ammoniak und den Amidverbindungen, wie schon erwähnt, z. T. elementarer Stickstoff in Freiheit gesetzt wird, gibt es auch unter der Unzahl der verschiedenen Bakterienarten solche, welche Nitrate reduzieren, und zwar nicht etwa wieder zu Ammoniak, sondern zu freiem Sauerstoff, wie von Burri und Stutzer[30]) ein-

[30]) Über Nitrat zerstörende Bakterien und den durch dieselben bewirkten Stickstoffverlust. Zentralbl. f. Bakt., 2. Abt., I, 1895.

wandfrei festgestellt wurde. Solche anaërob lebende, reduzierende Bakterien sind aus Mist gezüchtet worden, und es sind darunter solche Arten, die angeblich bis 99 v. H. des in der Nährlösung gebotenen Stickstoffes in elementarer Form in Freiheit setzen, den Rest aber zum Aufbau ihrer Körpersubstanz verwenden. Ob die Ergebnisse solcher Versuche auch auf natürliche Verhältnisse zu übertragen sind, ob gerade diese Bakterienarten für die namhaften Verluste im lagernden Stallmist verantwortlich sind, mag dahingestellt bleiben. Jedenfalls kann für die gegenwärtigen Betrachtungen der mit den erwähnten Vorgängen verbundene Verlust an assimilierbarem Stickstoff nicht vernachlässigt werden, denn er bildet immerhin einen Teil derjenigen Verluste, welche nachweisbar im lagernden Stallmist eintreten.

Daß bei dem Zersetzungsvorgange, dem die stickstoffhaltigen Bestandteile des Düngers unterworfen sind, namhafte Stickstoffmengen verloren gehen, war bereits zu einer Zeit bekannt, wo das Wesen dieser Vorgänge noch in tiefes Dunkel gehüllt und die dabei tätigen Mikroorganismen gänzlich unbekannt waren. Schon von Thaer[31]) wurde im Anfange des vorigen Jahrhunderts auf die Notwendigkeit hingewiesen, durch eine sorgfältige Pflege des Stalldüngers dessen wertvolle Eigenschaften zur Entfaltung zu bringen und zu erhalten; ein Beweis dafür, daß schon zu jener Zeit Beobachtungen darüber vorlagen, daß durch ungeeignete Behandlung des Düngers der Wert desselben mehr oder weniger erheblich vermindert werden könne. Die Tatsache, daß die Düngung mit frischem, noch unzersetztem Stallmist dem Pflanzenwachstum schädlich ist, war Thaer ebenfalls bereits bekannt, wenn auch die wissenschaftliche Erklärung hierfür erst der neuesten Zeit vorbehalten war. Bestimmte Bodenbakterien, welche im Dünger selbst noch nicht vorhanden sind, finden in der unzersetzten organischen Substanz des letzteren die besten Lebensbedingungen und verbrauchen den größeren Teil der stickstoffhaltigen Materie zum Aufbau ihrer Körpersubstanz, der schwer zersetzlichen Nukleinverbindungen, während andererseits unter bestimmten Verhältnissen so viel kohlensaures Ammoniak gebildet werden kann, daß dessen ätzende Eigenschaft zur Geltung kommt und eine schädigende Wirkung auf das Pflanzenwachstum ausübt. Bevor der Stallmist in den Boden und dadurch mit den erwähnten Bodenbakterien in Berührung kommt, muß er längere Zeit lagern, bis seine organische

[31]) Grundsätze der rationellen Landwirtschaft, 1847, Bd. 2, S. 215

Substanz soweit zersetzt ist, daß sie eine geeignete Nährstoffquelle für die Bodenbakterien nicht mehr abgibt. Hierdurch werden die erwähnten Stickstoffverluste und schädlichen Wirkungen des frischen Düngers zwar vermieden, aber dafür treten andere und zum Teil noch erheblichere Verluste beim Lagern des Düngers ein, wie schon erwähnt wurde. Selbst unter den günstigsten Bedingungen und bei sorgfältigster Pflege des Düngers betragen die Verluste bis zu 40 v. H. der gesamten ursprünglich vorhandenen Stickstoffmenge, die aber unter ungünstigen Verhältnissen, wie aus den Versuchen von Müntz und Girard[32]) hervorgeht, bis auf 60 v. H. steigen können. Nach eingehenden Versuchen von Hansen und Günther[33]) wurden nach 10 bis 11 Wochen langer Lagerung des Düngers Verluste von 17,8 bis 23,7 v. H. der gesamten Stickstoffmengen festgestellt, und Pfeiffer[34]) fand bei einer Lagerungsdauer von 107 bis 113 Tagen einen Verlust von 19,1 bis 24,7 v. H. der gesamten, ursprünglich im Dünger vorhandenen Stickstoffmenge. Der Verlust im Flachstalldünger, der täglich auf die Düngerstätte geschafft wurde, war stets erheblich größer (rund 37 v. H.) als derjenige im Tiefstalldünger, welcher nur 13,2 v. H. betrug, wie aus den Versuchen von Märcker und Schneidewind[35]) hervorgeht. Es decken sich diese Versuchsergebnisse demnach durchaus mit den schon erwähnten Beobachtungen, welche bereits Thaer zu der Forderung einer sorgfältigeren Pflege des Stallmistes veranlaßten, und es steht fest, daß auch bei zweckmäßigster Lagerung des Düngers Verluste an Stickstoff eintreten, deren Wert allein für Deutschland auf jährlich 600 Millionen Mark geschätzt wird.

Unter solchen Umständen war es natürlich, daß schon frühzeitig versucht wurde, den Dünger zu konservieren, um die wertvollen N-Verbindungen desselben zu erhalten. Alle in dieser Richtung angestellten Versuche gingen darauf hinaus, die flüchtigen Ammoniakverbindungen, namentlich das kohlensaure Ammon, zu binden, was man durch den Zusatz von Säuren, Eisenvitriol, Superphosphat u. dergl. erreichen zu können glaubte. Praktische Erfolge wurden aber damit nicht erzielt, wie auch die sorgsamste mechanische Pflege des

---

[32]) Die Stickstoffverluste im Stallmist und deren Verminderung. Deutsch von J. H. Vogel, Berlin 1894.

[33]) Arbeiten der D. L. G., Heft 30, 1898.

[34]) Arbeiten der D. L. G., Heft 73, 1902.

[35]) Ernährung der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen 1915, S. 226.

Düngers die namhaften Stickstoffverluste nicht einzuschränken vermochte. Der Grund für die Mißerfolge dieser Bemühungen lag eben darin, daß man von der Voraussetzung ausging, daß die durch den Geruch kenntlichen flüchtigen Ammoniakverbindungen ausschließlich oder doch vorwiegend für den Verlust an Stickstoff verantwortlich seien. Nachdem aber in neuester Zeit die verwickelten bakteriologischen Vorgänge, die sich im Dünger bei dessen Zersetzung abspielen, näher erkannt wurden, kam man zu der Erkenntnis, daß in hohem Maße auch die die Nitrate reduzierenden anaëroben Bakterien, die von Burri und Stutzer[36]) aus Mist gezüchtet wurden, sowie ähnlich wirkende andere Bakterienarten für den Stickstoffverlust verantwortlich sind. Allerdings sind beim frischen Mist innerhalb 24 Stunden nach dessen Ausscheidung Verluste bis zu 10 v. H. der vorhandenen Stickstoffmenge beobachtet worden, die auf eine Verflüchtigung von Ammonverbindungen zurückzuführen sind; aber der weitere Verlust beim Lagern des Düngers in größeren Haufen beruht unzweifelhaft auf einer Entbindung von freiem Stickstoff durch eine mittelbare oder auch unmittelbare Bakterientätigkeit, wie schon Seite 8 ff. eingehend erörtert wurde.

Diejenigen Stickstoffverbindungen, welche solcher Zerstörung anheimfallen, entstammen vorwiegend dem Harn, aber die dabei mitwirkenden Mikroorganismen sind ursprünglich in den festen Exkrementen enthalten, denn der Harn verläßt den Körper bakterienfrei, und unter den aus der Atmosphäre in ihn gelangenden Mikroorganismen, den spezifischen Harnbakterien, sind bislang noch keine gefunden worden, welche Stickstoff in elementarem Zustande in Freiheit zu setzen vermögen. Die festen Exkremente hingegen enthalten bereits bei der Entleerung große Mengen der verschiedensten Bakterienarten, die im Darm der Tiere angesiedelt sind, und ein namhafter Teil der Stickstoffverbindungen des Kotes besteht, wie schon früher erwähnt wurde, aus den schwer zersetzlichen Proteinkörpern der Bakterienleiber. Für Harn und feste Exkremente, jedes gesondert für sich bewahrt, würde daher kaum eine Gefahr der Entbindung freien Stickstoffes vorliegen. Erst durch die Ansiedelung der Kotbakterien im Harn sind die Voraussetzungen für eine Zerstörung der reichlich vorhandenen und leicht zersetzlichen Stickstoffverbindungen des letzteren gegeben. Aus diesen Erwägungen ergibt sich aber der Weg für eine Abwehr der Stickstoffverluste, der auf Grund

---

[36]) a. a. O.

praktischer Versuche auch tatsächlich zu dem erstrebten Ziele geführt hat. Der Düngerwert der festen Exkremente mit ihren geringen Mengen schwer zersetzlicher Stickstoffverbindungen ist ein unbedeutender und nur durch den verhältnismäßig hohen Gehalt an humusbildender Substanz ist sein Wert bedingt. Der Harn hingegen mit seinem reichlichen Gehalt an leicht zersetzlichen Stickstoffverbindungen enthält nur unbedeutende Mengen humusbildender organischer Substanz, und sein Düngerwert ist im Gegensatz zu den festen Exkrementen ein sehr bedeutender.

Um Stickstoffverluste nach Möglichkeit zu vermeiden, sollte der Harn von dem Kote getrennt und für sich aufbewahrt werden, und zwar in einer Weise, die das Entweichen der flüchtigen Ammonverbindungen zu verhindern geeignet ist. Diese natürliche Schlußfolgerung aus den vorhandenen wissenschaftlichen Erfahrungen und Versuchsergebnissen wurde von Soxhlet[37]) gezogen, welcher bereits im Jahre 1897 den Nachweis führte, daß nur die getrennte Gewinnung und Aufbewahrung der festen und der flüssigen Ausscheidungen zu einem wesentlichen Fortschritt in der Frage der Düngerbehandlung führen könne. Die Ausführungen Soxhlets fanden allerdings in den Kreisen der praktischen Landwirtschaft noch nicht die gebührende Würdigung, aber sie hatten den Erfolg, daß die aussichtslosen Versuche zur Düngerkonservierung in der bisherigen Weise aufgegeben und durch solche ersetzt wurden, welche die Erhaltung der Stickstoffverbindungen in der Jauche bezweckten. Bei den Vertretern der wissenschaftlichen Landwirtschaft fanden die Gedanken Soxhlets ungeteilten Beifall, wie aus den verschiedenen in dieser Hinsicht angestellten Erörterungen und Veröffentlichungen hervorgeht.

Heinrich, Dünger und Düngen, 6. Auflage 1910, S. 14.

E. Böhme, Studien über Konservierung und Anwendung des Stickstoffes im Harn und in der Jauche.

Immendorf, Deutsche Landw. Presse 1910, S. 136.

Schneidewind, Ernährung der landw. Kulturpflanzen 1915, S. 228.

Derselbe, Stickstoffquellen und Stickstoffdüngung 1908, S. 58.

Unter dem Einfluß dieser wissenschaftlichen Bestrebungen fand sich alsbald aber auch ein erfahrener praktischer Landwirt,

[37]) Wochenblatt des Landw. Vereins in Bayern, 87, Nr. 47, 1897.

der Rittergutsbesitzer Ortmann, welcher es sich angelegen sein ließ, den Vorschlägen Soxhlets auch in der praktischen Landwirtschaft Eingang zu verschaffen, und die zu diesem Zwecke angestellten praktischen Versuche und Arbeiten haben zu dem Verfahren der Düngerbehandlung geführt, nach welchem die Stickstoffverluste auf ein geringstes Maß herabgesetzt werden können. Das Verfahren der getrennten Jauchegewinnung besteht im wesentlichen darin, daß die letztere durch passende Filtervorrichtungen vor jeder Verunreinigung durch die festen Kotbestandteile geschützt und vor Luftzutritt möglichst bewahrt wird.

Welche Mengen von gebundenem wirksamen Stickstoff durch Anwendung eines geeigneten Verfahrens der Jauchegewinnung der Landwirtschaft erhalten bleiben könnten, zeigt eine einfache Rechnung von Andrä und Vogel[38]). Bei einem Rindviehbestand von 14 Millionen Stück Großvieh und 7 Millionen Stück Jungvieh, und bei der Annahme einer täglichen Ausscheidung von 8 bezw. 4 Liter Harn würde sich die tägliche Harnmenge auf 140 Millionen Liter, die Jahresproduktion auf 51 Millionen Kubikmeter berechnen. Da in der Jauche durchschnittlich 0,5 % Stickstoff enthalten sind, so ergibt sich eine jährliche Menge von 255 Millionen Kilogramm Stickstoff, die mit dem Harn des Rindviehes ausgeschieden werden. Nimmt man den Stickstoffgehalt im Chilesalpeter zu 15,5 %, so würden die 255 Millionen Kilo Harnstickstoff einer Menge von 16,4 Millionen Doppelzentner Chilesalpeter entsprechen. Da im letzten Jahre vor dem Kriege in der deutschen Landwirtschaft nur insgesamt 6 Millionen Doppelzentner Chilesalpeter verwendet wurden, so ergibt sich durch den Vergleich, daß eine völlige Unabhängigkeit der deutschen Landwirtschaft von der überseeischen Salpetereinfuhr zu erreichen wäre, sofern das Verfahren der getrennten Jauchegewinnung allgemein Eingang fände, denn eine Steigerung des durchschnittlichen Stickstoffgehaltes der Jauche von 0,25 bis auf 0,5 v. H. würde leicht möglich sein, wie die praktischen Ergebnisse mit dem erwähnten Verfahren gezeigt haben. Würde man von der gesamten Harnmenge noch $^1/_3$ als Verlust beim Weidegang usw. in Abzug bringen, so verbliebe immer noch ein Gewinn an Stickstoff, dessen Wert sich auf 110 Millionen Mark jährlich berechnen würde.

---

[38]) Bericht über die in den Kriegsjahren 1915/16 auf Veranlassung des ständigen Ausschusses des Landeskulturrates für das Königreich Sachsen pp. ausgeführten Versuche über .... Jauche.

Kehren wir nun zu unseren früheren Betrachtungen zurück, so ergibt sich, daß in der dritten und letzten Phase des Kreislaufprozesses auf natürlichem, und nicht etwa durch unseren derzeitigen Kulturzustand bedingten Wege, eine immerhin nennenswerte Stickstoffmenge verloren geht; aber für diesen natürlichen Verlust hat auch die Natur vorsorglich einen Ausgleich geschaffen, und zwar ebenfalls durch die vermittelnde Tätigkeit der Mikroorganismen.

Die Tätigkeit der hier in Frage kommenden Bakterienart, oder der Arten, erfolgt allerdings in engster Verbindung mit dem Pflanzenwachstum selbst, aber die eigentliche Tätigkeit, d. h. die Assimilation des freien Stickstoffes der Luft, ist ausschließlich auf Kosten dieser Mikroorganismen, der Knöllchenbakterien, zu setzen.

Die Tätigkeit dieser Mikroorganismen und deren Verhältnis zu den Leguminosen wurde durch Hellriegel[39]) und von Wilfarth[40]) eingehender untersucht, und durch Beyerinck[41]) wurde die Kenntnis derselben wesentlich erweitert.

Die Knöllchenbakterien sammeln sich bekanntlich in Verdickungen an den Wurzeln der Leguminosen und entnehmen ihre Nahrung ausschließlich dem freien Stickstoff der Luft, aber das eigenartige Verhältnis zwischen den Leguminosen und ihren Stickstofflieferern ist auch heute noch nicht völlig aufgeklärt. Während Fischer[42]) die Leguminose als Parasit aufgefaßt wissen will, welcher die Bakterien anlockt und umhüllt, um sich deren stickstoffhaltigen Inhalt alsdann anzueignen, wird von anderer Seite das Zusammenleben dieser Organismen allgemein als Symbiose aufgefaßt. Die Bakterien, welche die Zellen der Wurzelknöllchen anfüllen, erscheinen zuerst als schlanke Stäbchen, die aber alsbald verschiedenartige Formen annehmen. Diese in der Gestalt veränderten, spindelförmigen oder ovalen Bakterien, bei deren Auftreten erst ein energischeres Pflanzenwachstum beginnt, wurden vielfach als Involutionsformen aufgefaßt, und man nahm an, daß die Leguminose von der Stickstoffsubstanz der absterbenden Bakterien lebe.

Neuerdings geht indessen die Ansicht dahin, daß die in der Form veränderten Mikroorganismen erst die aktiven

[39]) Landw. Vers.-Stat. 33, 1886, S. 464.
[40]) Landw. Vers.-Stat. 34, 1887, S. 460.
[41]) Botan. Zeitung 46, 1888, S. 725.
[42]) Vorlesungen über Bakterien, 1897, S. 90 ff.

Formen sind, welche den Luftstickstoff assimilieren und Stoffwechselprodukte bilden, die der Leguminose als Nahrung dienen. Wie dem auch sei; auf jeden Fall wird die Leguminose ihren Stickstoffbedarf in organisch gebundener Form aufnehmen, wodurch dieselbe eine eigenartige Ausnahmestellung unter den höheren chlorophyllführenden Pflanzen einnehmen würde, welch letztere ja sonst nur von anorganischer Materie leben.

Da ein kräftigeres Wachstum der Leguminosen tatsächlich immer erst dann beginnt, wenn die Formveränderung der Bakterien eintritt, so könnte man allerdings annehmen, daß, falls man die Mißbildungen als Involutionsformen der im Absterben begriffenen Bakterien auffassen wollte, das Bakterieneiweiß erst zersetzt und in die für chlorophyllführende Pflanzen erforderliche assimilierbare Form gebracht würde. Solcher Annahme würde aber immer noch die Tatsache entgegenstehen, daß die Leguminosen, wie schon die Versuche von Hellriegel (l. c.) zeigten, auf eine Düngung mit mineralischem Stickstoffdünger gar nicht reagieren. Es muß daher als feststehend betrachtet werden, daß die Leguminosen ihre Stickstoffnahrung im wesentlichen, wenn nicht in Form des Bakterieneiweißes, so doch in organisch gebundener Form in den Stoffwechselprodukten der Bakterien aufnehmen, und damit würden die Leguminosen eine Sonderstellung unter den grünenden Pflanzen einnehmen, die sich mit dem sonst übersichtlichen Bilde des Stickstoffkreislaufes, der mit der Assimilation des rein mineralisch gebundenen Stickstoffes seitens der Pflanzenwelt beginnt, nur dadurch in Einklang bringen läßt, daß man die Leguminosen aus dem eigentlichen Kreislaufe ausschaltet und sie mitsamt ihren Knöllchenbakterien nur als Regulator für das unveränderte Bestehen des Kreislaufes des Stickstoffes betrachtet, als welcher die Leguminosen-Bakteriengemeinschaft sich tatsächlich darstellt.

Die Menge des assimilierbaren Stickstoffes, welche durch die Lebenstätigkeit der Knöllchenbakterien dem Luftstickstoff entnommen und in gebundene, zunächst den Leguminosen zugängliche Form umgewandelt werden kann, beträgt nach einer Zusammenstellung vorhandener Versuchsergebnisse [43]) für 1 Hektar mit diesen Pflanzen bebauten Bodens jährlich rund 190 Kilogramm.

Abgesehen von den Knöllchenbakterien sind im Laufe der Zeit aber noch verschiedene andere Bakterienarten festgestellt

[43]) **Löhnis, Handbuch der landw. Bakt., S. 667.**

worden, die, unabhängig von der Pflanzenvegetation, selbständig lebend, den freien Stickstoff der Atmosphäre assimilieren können. Hierunter sind besonders erwähnenswert: Clostridium Pasteurianum, Azotobakter chroococcum und Azotobakter agilis. Ob und in welchem Maße diese Mikroorganismen unter natürlichen Verhältnissen den Luftstickstoff binden und dem Kreislaufe zuführen können, läßt sich gegenwärtig nicht entscheiden. Vielfache Beobachtungen über Anreicherung des Bodens an Stickstoff aber liegen vor, die sich nur dadurch erklären lassen, daß noch andere unbekannte Kräfte, vermutlich Mikroorganismen, vorhanden sein müssen, welche den atmosphärischen Stickstoff binden und in assimilierbare Form umwandeln.

Wenn also auf der einen Stelle durch die reduzierende Tätigkeit gewisser Bakterienarten eine geringe Stickstoffmenge dem Kreislaufe entzogen wird, so wird dieselbe auf der anderen Seite reichlich, ebenfalls durch Mikroorganismen, ersetzt. Jedenfalls findet ein Ausgleich statt, und das Endergebnis würde sein, daß unter natürlichen Verhältnissen während des Kreislaufes in seiner ganzen Ausdehnung kein Verlust an Stickstoff stattfindet.

Dieser Kreislauf, in seiner Allgemeinheit betrachtet, würde ein recht anschauliches Bild gewähren, wenn man die besonderen Vorgänge in seinen einzelnen Phasen unberücksichtigt läßt. Die Pflanze im engeren Sinne, d. h. mit Ausschluß der Pilze, entnimmt ihren Stickstoffbedarf dem Boden nur in Form von Salpetersäure und verarbeitet ihn zu organischen Stickstoffverbindungen, die der Pflanze während deren ganzer Lebensdauer erhalten bleiben, denn der Stoffwechsel der Pflanzen besteht lediglich in einer respiratorischen Äußerung, an der jedoch der Stickstoff in keiner Weise beteiligt ist. Die organische Stickstoffsubstanz wird dann, soweit die Pflanze dem tierischen Organismus als Nahrung dient, von letzterem weiter verarbeitet, und hier im Tierreiche findet der Stickstoff-Kreislauf qualitativ seinen Höhepunkt, indem hier die höchstzusammengesetzten organischen Stickstoffverbindungen synthetisch aufgebaut werden, die dem tierischen Leben eigen sind. Von hier an beginnt die absteigende Linie des Kreislaufes. Der Synthese folgt der stufenweise Abbau der Eiweißkörper des abgestorbenen Tierkörpers durch die Bakterien, welche sich hierdurch vom tierischen sowohl wie vom pflanzlichen Organismus streng unterscheiden. Das Gesamtergebnis des Bakterienlebens ist die völlige Zersetzung der organischen Stickstoffverbindungen zu dem anorganischen Stick-

stoffoxyd, der Salpetersäure, und damit erreicht der Kreislauf seinen tiefsten Stand, um im Pflanzenleben wieder den Aufstieg zu beginnen.

Das wäre der ideale Kreislauf, dessen Bild aber bei eingehender Betrachtung der besonderen Vorgänge wesentlich getrübt erscheint. Diejenigen abgestorbenen Pflanzen oder Pflanzenteile, welche im Boden verbleiben oder ihm direkt wieder zugeführt werden, verfallen ohne weiteres der zersetzenden Tätigkeit der Bakterien, wodurch die Stickstoffsubstanz, ohne den Tierkörper passiert zu haben, wieder mineralisiert wird. Das wäre der kleine Kreislauf zwischen dem Pflanzenreiche und der Bakterienwelt, der vollkommen für sich besteht und in sich geschlossen ist, bei dem aber ebenfalls kein Stickstoff in Verlust gerät. Ob die Bakterien in ihrer Gesamtheit an diesem kleinen Kreislaufe beteiligt sind, kann fraglich erscheinen. Bei der großen Verschiedenheit der Mikroorganismen hinsichtlich ihrer Arbeitsleistung hat die Annahme sehr viel Wahrscheinlichkeit für sich, daß nur ein Teil derjenigen Arten, die ihre Stickstoffnahrung in Form von Eiweiß aufnehmen, das Pflanzeneiweiß zu verarbeiten vermögen, während andere hingegen des tierischen Eiweißes bedürfen. Eine solche Annahme erscheint schon dadurch begründet, daß die meisten der bekannten Bakterienarten, die sich auf eiweißhaltigen Stoffen tierischen Ursprunges ansiedeln, die Fäulnisbakterien sowohl als die Krankheitserreger, ihre Lebens- und Wachstumsbedingungen nur bei schwach alkalischer bezw. amphoterer Reaktion des Nährsubstrates finden, und daher auf Pflanzenteilen, die fast stets eine mehr oder weniger stark saure Reaktion zeigen, gar nicht würden gedeihen können. Die Zersetzung des Pflanzenkörpers mit dem in ihm enthaltenen Pflanzeneiweiß geht daher auch unter ganz anderen Verhältnissen, insbesondere ohne die Entwicklung stark riechender Zersetzungsprodukte vor sich, als die faulige Zersetzung der tierischen Eiweißkörper, und es ist daher anzunehmen, daß für den Abbau der vegetabilischen Eiweißkörper besondere, nur für diesen Zweck bestimmte Arten von Mikroorganismen in Frage kommen. An dem kleinen Kreislaufe des Stickstoffes würde demnach nur die Pflanzenwelt und eine gewisse Anzahl besonderer Bakterienarten beteiligt sein, während für den großen Kreislauf zum Abbau der komplizierten tierischen Eiweißkörper andere Arten in Frage kämen.

Bei der bisherigen Betrachtung des Anteils, den die verschiedenen Organismen an dem Kreislaufe des Stickstoffes hinsichtlich des Aufbaues und des Abbaues der organischen

Stickstoffverbindungen haben, war in aufsteigender Linie die Bildung der Körpersubstanz, in absteigender Linie aber vorwiegend der Stoffwechsel der Mikroorganismen ins Auge gefaßt. Dieser Vorgang ist nicht ganz folgerichtig, da ja einerseits die Bakterientätigkeit nicht nur eine zersetzende, sondern hinsichtlich der Bildung des Proteïns des Bakterienkörpers zweifellos auch eine synthetische ist, während andererseits der tierische Organismus das zu seiner Ernährung erforderliche Eiweiß auch erst in einfacher zusammengesetzte Verbindungen, die Aminosäuren zerlegt, bevor er daraus die ihm eigentümlichen Eiweißgebilde aufbauen kann. Dieser Abbau und Wiederaufbau ist im Grunde genommen selbst wieder ein Kreislauf innerhalb des Tierreiches und mehr noch im Reiche der Mikroorganismen, der das Bild des eigentlichen Kreislaufes in seinen Einzelheiten zu einem sehr komplizierten gestaltet.

Die Rolle, welche den Bakterien in der Natur zuerteilt ist, ist eine sehr mannigfaltige, und nur durch das Ineinanderarbeiten ihrer verschiedenen Arten ist der Bestand des Kreislaufes bedingt. Wie schon gesagt, ist ein tierisches Leben undenkbar ohne das gleichzeitige Bestehen des Pflanzenreiches, während letzteres in Verbindung mit der Welt der Mikroorganismen wohl bestehen kann. Ein Pflanzenleben aber ohne Bakterien ist ebenso unmöglich, wie das tierische Leben für sich allein. Allerdings könnte die Pflanze wachsen und gedeihen, aber nur so lange, bis der ganze Salpeterstickstoff des Bodens verbraucht und in organische Verbindungen übergeführt wäre; alsdann würde das Pflanzenleben zu Ende sein. Während aber keines der beiden Reiche, weder das Tier- noch das Pflanzenreich, jedes für sich oder auch gemeinsam miteinander bestehen kann, bilden die Mikroorganismen in ihrer Gesamtheit eine Gemeinschaft von Lebewesen, die vollkommen für sich allein bestehen und einen Kreislauf des Stickstoffes ohne die Mitwirkung des Tier- oder Pflanzenreiches unterhalten können. Auf der einen Seite stehen die Vertreter derjenigen Arten, die, wie die erwähnten Knöllchenbakterien und andere, den elementaren Stickstoff aus dem unerschöpflichen Vorrat der Atmosphäre entnehmen und aus ihm das hoch zusammengesetzte Bakterieneiweiß aufbauen, auf der entgegengesetzten Seite diejenigen einzelligen Lebewesen, welche zu ihrer Ernährung der Eiweißkörper bedürfen, und daher zweifellos auch in dem Proteïn der abgestorbenen Leiber der ersteren ihre Lebensbedingung finden dürften. Die Stoffwechselprodukte dieser letzteren Arten würden wiederum die

Lebensbedingungen für die zwischen den beiden Extremen liegenden Arten abgeben und den dauernden Bestand der gesamten Bakterienwelt gewährleisten. Die bedeutendste Rolle im Haushalte der Natur spielen daher die Mikroorganismen, ohne die kein Kreislauf des Stickstoffes, kein Tier- und kein Pflanzenreich denkbar wäre. Sie bilden die unsichtbare, im stillen schaffende Kraft, durch die der Bestand alles organischen Lebens bedingt ist.

Unter natürlichen und ursprünglichen Verhältnissen würde daher nie ein Mangel an assimilierbarem Stickstoff für die Pflanzenwelt zu befürchten sein, aber in Wirklichkeit liegen die Verhältnisse anders. Die Kultur hat Zustände geschaffen, die von der Natur nicht vorgesehen waren.

Pflanzenprodukte, wie auch die Rückstände ihrer industriellen Verarbeitung, finden zum großen Teil keine Verwendung an der Stelle, an welcher die Pflanzen ihren Nährstoffbedarf dem Boden entnommen haben; die Produkte des tierischen Stoffwechsels und gerade der an Stickstoff reichste Teil, der Harn, gelangen nicht dort in den Boden, wo ihre Gegenwart für die Erhaltung des Kreislaufes des Stickstoffes erforderlich wäre, und ein Fortschritt der Wissenschaft mit seinen hygienischen Bestrebungen hat es zuwege gebracht, daß die Ausscheidungen des Menschen, die einen bedeutenden Faktor in dem Stickstoffvorrate der Natur ausmachen, zum größten Teile dem Ackerboden dadurch entzogen werden, daß sie in die Flüsse geleitet werden und sich in den Weiten des Meeres verlieren, und dieses zumeist aus Furcht vor jenen kleinsten Lebewesen, deren Dasein das Fundament für alles übrige Leben bildet.

Von den gewaltigen Mengen gebundenen Stickstoffes, welche auf diese Weise dem Ackerboden entzogen werden, kann man sich einen Begriff machen, wenn man erwägt, daß die im Harn des erwachsenen Menschen täglich abgegebene Stickstoffmenge im Mittel 16 Gramm, für Kinder je nach dem Alter entsprechend weniger beträgt. Diese Zahl stellt allerdings nur einen Mittelwert dar, wie er sich aus der großen Zahl der von den verschiedensten Gelehrten angestellten Stoffwechselversuche ergibt.[44]) In Wirklichkeit schwankt die Menge des Harnstickstoffes sehr erheblich und ist selbstverständlich abhängig von der mit der Nahrung aufgenommenen Stickstoffmenge. Im allgemeinen Durchschnitt für Kinder und Erwachsene darf man den täglichen Harnstickstoff zu 12 Gramm annehmen, was auf

---

[44]) Tigerstedt, Lehrbuch der Physiologie des Menschen, S. 110.

rund 70 Millionen Menschen berechnet, täglich 840 000 Kilogramm Stickstoff ausmachen würde. Wenn man hiervon nur die Hälfte als auf die Städte entfallend annimmt, deren Harnerzeugung vorwiegend in die Flüsse geht, so ergibt sich z. B. für das gesamte Deutsche Reich ein täglicher Verlust von 420 000 Kilogramm gebundenen Stickstoffes, entsprechend 2 550 000 Kilogramm Natronsalpeter, oder 912 500 000 Kilogramm jährlich. Allerdings sind diese Stickstoffmengen für den Kreislauf in seiner weitesten Ausdehnung nicht eigentlich verloren, denn auch der Meeresboden hat seine Vegetation, die wiederum für die Ernährung der Fische erforderlich ist und durch diese zum Teil wenigstens in den menschlichen Exkrementen dem Erdboden wieder zugeführt werden kann. Die größte Menge aber des besonders mit dem Harn abgegebenen Stickstoffes bleibt in den Gewässern festgelegt und kommt für die Vegetation des Ackerbodens nicht mehr in Frage. Ähnlich verhält es sich mit denjenigen Pflanzenprodukten und den Erzeugnissen und Abfällen verschiedener Industriezweige, welche auf weite Entfernungen hin fortgeschafft und ausgeführt werden. Auch der Stickstoff dieser Produkte geht im eigentlichen Sinne nicht verloren, wohl aber für diejenige Gegend, deren Boden er entnommen ist, während andere Gegenden in demselben Maße an stickstoffhaltigen Pflanzennährstoffen bereichert werden.

Dieser örtliche Verlust an Stickstoff kann zwar in gewissem Maße durch Zufuhr von Stickstoffdünger von außerhalb wieder ausgeglichen werden, aber doch nur unter Aufwendung erheblicher Kosten und nur dann, wenn keine besonderen Gründe für eine Behinderung der Zufuhr vorliegen. Zudem birgt eine solche Notwendigkeit immer eine Abhängigkeit in sich, die unter Umständen zu den bedenklichsten Folgen führen kann. Die wirtschaftliche Unabhängigkeit vom Auslande ist die erste Voraussetzung für die Entwickelung und Aufrechterhaltung der politischen Macht des Staates, und diese Unabhängigkeit zu sichern, sind alle Kräfte aufzuwenden, die die Natur dem Menschengeiste zur Verfügung stellt.

Von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet, kann der Kreislauf des Stickstoffes auch nur in räumlich begrenztem Sinne in Betracht kommen. Was über diese Grenzen hinausgeht, ist als Verlust zu betrachten, und es fragt sich, ob den durch die derzeitigen Kulturverhältnisse bedingten Verlusten an aktivem Stickstoff eine Einnahme gegenübersteht, die das Gleichgewicht der Stickstoffbilanz aufrecht zu erhalten vermag.

Für das Deutsche Reich kann man den jährlichen Verlust

an Harnstickstoff annähernd auf 150 Millionen Kilogramm schätzen, was aber auf andere Weise verloren geht, entzieht sich jeder Beurteilung. Nimmt man aber willkürlich an, daß diese Menge das Doppelte der für den Harnstickstoff berechneten beträgt, so würde man auf einen jährlichen Gesamtverlust von annähernd 500 Millionen Kilogramm Stickstoff kommen, dem keine andere natürliche Einnahme gegenübersteht, als die durch die Tätigkeit einiger Bodenbakterien geschaffene, unter denen in der Hauptsache aber nur die mehrfach erwähnten Knöllchenbakterien von größerer Bedeutung sind, sowie die geringen Mengen Salpetersäure, welche durch den elektrischen Funken beim Gewitter aus dem Luftstickstoff gebildet und mit dem Regen dem Boden zugeführt werden. Daß sich nach Gewitter im Regen stets Salpetersäure findet, ist wohl zuerst von Liebig[45]) festgestellt worden. Nach Knop[46]) beträgt die Menge derselben 0,1 bis 1 Milligramm in 1 Liter, und aus dem mittlerem Gehalt von 0,5 Milligramm Salpetersäureanhydrid und einer jährlichen durchschnittlichen Niederschlagsmenge von 0,909 Kubikmeter Regenwasser auf 1 Quadratmeter Bodenfläche würde sich die auf 1 Hektar entfallende Menge Stickstoff jährlich auf rund 1,2 Kilogramm berechnen, was auf die gesamte 55 Millionen Hektar betragende Bodenfläche des Deutschen Reiches etwa 66 Millionen Kilogramm gebundenen Stickstoffs jährlich ausmachen würde. Hiervon kann aber nur ein Teil für den Ackerboden in Frage kommen, da der Regen auch auf unbebauten Boden fällt. Höher als auf 30 Millionen Kilogramm Stickstoff wird man den für die Pflanzenernährung wirklich zur Geltung kommenden Anteil kaum annehmen dürfen.

Erheblich größer ist die durch die Knöllchenbakterien in assimilationsfähige Form gebrachte Stickstoffmenge, welche für 1 Hektar mit Leguminosen bestellten Boden, wie schon erwähnt, jährlich auf 190 Kilogramm geschätzt ist. Die Menge des auf diese Weise zu gewinnenden Stickstoffes ist abhängig von der Größe der Bodenfläche, welche für den Anbau von Leguminosen in Frage kommt, und um den Verlust von etwa 500 Kilogramm Stickstoff zu decken, müßten von dem 54 Millionen Hektar betragenden gesamten Flächeninhalt des Deutschen Reiches ein namhafter Anteil mit Leguminosen bestellt werden.

Ob es möglich wäre, auf solche Weise den durch die

---

[45]) Ann. chim. phys. 35, S. 329.

[46]) Kreislauf des Stoffes, Leipzig 1868, I. S. 109, II. S. 58.

hygienischen und wirtschaftlichen Verhältnisse bedingten Stickstoffverlust auszugleichen, mag dahingestellt bleiben, aber unter der Voraussetzung dieser Möglichkeit doch jedenfalls nur dann, wenn die Bevölkerungszahl und die damit in Zusammenhang stehenden Faktoren stets unverändert blieben. Diese Annahme trifft für das Deutsche Reich nicht zu. Die Bevölkerungszahl ist eine stets wachsende und wird es hoffentlich auch ferner bleiben, aber je mehr dieses der Fall ist, um so weniger wird der Bestand an assimilierbarem Stickstoff den vermehrten Anforderungen genügen, die der Ackerboden zu leisten hat. In demselben Maße, wie die Bevölkerungszahl zunimmt, wird auch eine entsprechende Stickstoffmenge als Eiweiß in der Körpersubstanz festgelegt und damit dem Kreislaufe entzogen, während umgekehrt zur Erhaltung der stets wachsenden Bevölkerung erhöhte Anforderungen an den Boden gestellt werden.

Um diesen Ausfall an Stickstoff zu decken, würden die erwähnten Quellen nicht im entferntesten ausreichend sein, und es mußte daher auch schon frühzeitig nach einem Ersatz gesucht werden, nachdem durch Liebig das Dunkel erhellt war, welches bis dahin über allen hier in Betracht kommenden Fragen lagerte. Die Erkenntnis der Notwendigkeit und des Wertes der Zufuhr künstlicher stickstoffhaltiger Düngemittel konnte sich jedoch erst langsam Bahn brechen, und das Bestreben nach einer rationellen und intensiveren Bodenbewirtschaftung ist auch heute noch nicht abgeschlossen.

Der Gewinn an Stickstoff durch Zufuhr künstlicher Düngemittel

Als Stickstoffquellen kamen zunächst das Knochenmehl und der Guano in Betracht, das erstere jedoch überhaupt nur in bescheidenerem Maße, nachdem man dazu übergegangen war, die Knochen auf Leim zu verarbeiten, und ihr Rückstand vorwiegend nur noch als Phosphatdünger von Bedeutung war. Die südamerikanischen Guanolager aber erwiesen sich ebenso wenig unerschöpflich, wie die Ablagerungen des Chilesalpeters, welcher seit Anfang der 60er Jahre des vorigen Jahrhunderts für die Landwirtschaft als Stickstoffdünger nutzbar gemacht wurde. Die Einfuhr dieses Düngemittels nahm zwar ständig zu und betrug am Anfang unseres Jahrhunderts bereits 500 000 Tonnen jährlich, aber abgesehen von den Umständlichkeiten und den Gefahren, welche eine wirtschaftliche Abhängigkeit der heimischen Landwirtschaft von dem Auslande mit sich bringt, sowie von den bedeutenden Werten, welche dem eigenen Lande damit verloren gehen, mußte auch mit der Möglichkeit einer endlichen Erschöpfung dieser Stickstoffquelle gerechnet werden, denn Erhebungen an Ort und

Stelle hatten tatsächlich ergeben, daß bei der stets zunehmenden Ausfuhr dieses Düngemittels eine Erschöpfung der Salpeterlager in wenigen Jahrzehnten vorauszusehen ist.

Es war daher ein Fortschritt, als bei der Herstellung des Leuchtgases das als Nebenprodukt gewonnene Ammoniak der Landwirtschaft zugänglich wurde. Dieser Stickstoff gehört ja im Grunde genommen auch zu dem Bestande, den die Pflanzenwelt vor Jahrtausenden in organischer Bindung in sich aufgespeichert hat, der aber infolge der geologischen Umwälzungen dem Kreislaufe bis dahin entzogen war. Nun wird er durch die Verkokung der Steinkohle als Ammoniak in Freiheit gesetzt und als Nährstoff dem Boden wieder zugeführt. Die Gewinnung des Ammoniaks ist aber an die Verarbeitung der Steinkohle gebunden, und es ist fraglich, ob seine Menge hinreichend sein würde, um den stets erhöhten Ansprüchen des Ackerbodens zu genügen, umsomehr, als das Ammoniak auch noch anderen Zwecken dient und nur in beschränktem Maße der Landwirtschaft zur Verfügung steht.

Wenn der Ammoniakstickstoff auch nicht unmittelbar als Pflanzennährstoff in Frage kommt, sondern im Boden erst unter dem oxydierenden Einfluß der Bodenbakterien in salpetersaures Salz verwandelt wird, so ist er doch auch in dieser Verbindungsform von nicht zu unterschätzender Bedeutung und häufig der unmittelbaren Verwendung des Salpeters als Düngemittel vorzuziehen, er würde aber auch, sofern sich gewisse Hoffnungen bezüglich der Gewinnung von Hefeeiweiß bestätigen sollten, für die Futtermittelversorgung, ohne Inanspruchnahme des Bodens, von großem Werte sein.

Die Gewinnung des Ammoniaks aber ist im wesentlichen bis jetzt an die Verarbeitung der Steinkohle gebunden, und die Vorräte an letzterer sind, wenn auch überaus groß, so doch nicht unerschöpflich, sodaß immerhin einmal, wenn auch in fernsten Zeiten, ein Ende auch dieser Stickstoffquelle in Aussicht steht. Eine Gewähr für das unabänderliche Bestehen und eine Erweiterung des Stickstoffkreislaufes, wie sie dem Fortschreiten der Kultur, der Bevölkerungszunahme und der dadurch bedingten höheren Inanspruchnahme des Bodens entspricht, kann nur eine so unerschöpfliche Quelle bieten, wie sie sich in dem Stickstoff der Atmosphäre zeigt. Zunächst möge aber versucht werden, festzustellen, welche Einnahmen an Stickstoff unter Berücksichtigung der derzeitigen Verhältnisse der Stickstoffabgabe des Ackerbodens gegenüberstehen.

Bezüglich derjenigen Stickstoffmengen, die jährlich mit der Ernte dem Boden entzogen werden, lassen sich allgemein gültige

Zahlen allerdings nicht angeben, denn der Stickstoffgehalt der verschiedenen Feldfrüchte und Futterkräuter ist nicht nur an sich ein sehr verschiedener, sondern er schwankt auch für ein und dieselbe Pflanze je nach den örtlichen Verhältnissen und den Wachstumsbedingungen oft recht erheblich, und ebenso großen Schwankungen ist der Ernteertrag überhaupt unterworfen. Es lassen sich daher nur mittlere Werte berechnen, die, für eine Reihe von Jahren genommen, den tatsächlichen Durchschnittserträgen vielleicht nahekommen dürften. Nimmt man aus den für ein Anbaugewächs ermittelten Zahlen für den geringsten und den höchsten Ertrag an Samen oder Frucht, sowie an Blattwerk oder Stroh je den Mittelwert für 1 Hektar, und ebenso daraus den mittleren Gehalt an Stickstoff, so erhält man sehr annähernd die mittlere Stickstofferzeugung für Jahr und Hektar für diese Pflanze. Diese Rechnung müßte für jedes Anbaugewächs durchgeführt und, falls man auf wirklich genaue Werte kommen wollte, die mit dem betreffenden Gewächs bestandene Bodenfläche ermittelt werden. Eine solche Rechnung würde allerdings kaum möglich sein. Man wird sich mit einer größeren Anzahl der wichtigsten Kulturpflanzen begnügen müssen und annehmen, daß die Anbaufläche im Mittel für alle Pflanzen die gleiche sei.

Es ergibt sich so für etwa 30 der wichtigsten Anbaugewächse im Mittel für 1 Hektar Bodenfläche eine jährliche Produktion von rund 90 Kilogramm Stickstoff, der dem Boden entzogen wird. Diese Menge wurde sonst mit rund 70 Kilogramm für Jahr und Hektar angenommen, indessen erscheint die berechnete Zahl eher zu niedrig als zu hoch, in Anbetracht dessen, daß die stickstoffreichen Körnerfrüchte und die Futtergewächse in verhältnismäßig großen Mengen angebaut werden. Jedenfalls darf die Menge von 90 Kilogramm Stickstoff für Jahr und Hektar der tatsächlichen Erzeugung ziemlich nahe kommen und diese ist daher der weiteren Rechnung zugrunde gelegt.

Von der gesamten 54 Millionen Hektar betragenden Bodenfläche des Deutschen Reiches sind 34½ Millionen Hektar landwirtschaftlich nutzbare Bodenfläche, so daß also die gesamte jährliche Stickstoffernte für das Gebiet des Deutschen Reiches 31 050 000 Doppelzentner beträgt. Dieser Ausgabe stehen Einnahmen gegenüber, die zum Teil auf natürlichem Wege entstehend, zum Teil als Kunstprodukte dem Boden zugeführt werden.

In Betracht kommt zunächst diejenige Stickstoffmenge, die mit dem Saatgut in den Boden gelangt, und die für 1 Hektar

im Mittel mit 2½ Kilogramm angenommen werden kann; auf 34½ Millionen Hektar also 862500 Doppelzentner Stickstoff. Ferner kommt hinzu der mit den atmosphärischen Niederschlägen gewonnenene Stickstoff, welcher bereits früher (S. 26) auf 1,2 Kilogramm für Jahr und Hektar berechnet wurde. Auch für diesen kann nur derjenige Anteil in Frage kommen, welcher auf bebautes Land fällt. Also 34½ Millionen mal 1,2 Kilogramm gleich 414000 Doppelzentner Stickstoff.

Weit erheblicher sind die durch die Knöllchenbakterien in aufnehmbare Form gebrachten Mengen von Luftstickstoff. Da die Leguminosen ihren Stickstoffbedarf vornehmlich aus dieser Quelle decken, so kommt deren ganzer Stickstoffgehalt auf Kosten dieser Mikroorganismen. Derselbe beträgt bei einem mittleren Ernteertrag für den Hektar auf leichtem Boden 200 Kilogramm, auf schwerem Boden 102 Kilogramm, im Mittel 152 Kilogramm für Jahr und Hektar des mit Leguminosen bestandenen Bodens. Hierbei sind aber die Wurzeln außer Acht geblieben, in deren Knöllchen auch nach der Samenreife noch ein Stickstoffrest zurückbleibt. Unter Berücksichtigung dieses letzteren Faktors würde der Ertrag an Stickstoff für Jahr und Hektar wohl auf 190 Kilogramm zu schätzen sein, wie allgemein angenommen wird. Die mit Leguminosen oder anderen unter dem Einflusse von Knöllchenbakterien wachsenden Pflanzen bestandene Bodenfläche dürfte auf etwa 5 Millionen Hektar anzunehmen sein, sodaß die Erzeugung gebundenen Stickstoffes seitens dieser Mikroorganismen auf jährlich 9500000 Doppelzentner anzunehmen ist.

Der in der Jauche enthaltene Stickstoff würde, wie schon erwähnt (S. 18), bei der Annahme eines Rindviehbestandes von 14 Millionen Stück Großvieh und 7 Millionen Stück Jungvieh jährlich 255 Millionen Kilogramm betragen, wovon aber infolge der vorläufig noch üblichen Behandlung des Stalldüngers, sowie durch Umstände anderer Art rund die Hälfte in Verlust gerät, sodaß nur rund 127½ Millionen Kilogramm aus dieser Quelle in Rechnung gestellt werden können, d. h. 1275000 Doppelzentner Stickstoff.

Mit dem menschlichen Harn werden von den rund 70 Millionen Bewohnern des Deutschen Reiches, wie (S. 25) früher berechnet wurde, täglich 840000 Kilogramm Stickstoff ausgeschieden, wovon aber etwa die Hälfte in den Städten durch die Kanalisation verloren geht. Von dem Rest, der, mit den festen Exkrementen vermischt, den Fäulnisprozeß durchmacht, dürfte dasselbe gelten, wie für den Stallmist.

Durch Entweichen gasförmiger Ammonverbindungen und durch die Entbindung von freiem, elementarem Stickstoff wird die Hälfte des Restes in Verlust geraten, sodaß der aus dem menschlichen Harn entstammende, zur Wirkung gelangende Stickstoff kaum höher als auf rund 210 000 Kilogramm täglich zu berechnen ist. Das macht jährlich 76 650 000 Kilogramm oder 766 500 Doppelzentner Stickstoff.

Dem Stickstoff der festen Exkremente wird eine nennenswerte Bedeutung allerdings nicht zugeschrieben. Indessen kann er, besonders im Hinblick auf die Tätigkeit bestimmter Bodenbakterien, nicht unberücksichtigt bleiben. Er möge auf 1 000 000 Doppelzentner angenommen werden, während für die gewerblichen Abfälle und die Exkremente anderer Tiere ebenfalls der Betrag von 1 000 000 Doppelzentner Stickstoff in Rechnung gestellt werden soll.

Die in den Gasfabriken, den Kokereien und bei der Torfvergasung gewonnenen Ammonsalze, deren jährliche Erzeugung zurzeit in Deutschland, als Sulfat berechnet, etwa 480 000 Tonnen beträgt, steht der Landwirtschaft nur zum Teil zur Verfügung. Nimmt man für letztere 70 v. H. der ganzen Erzeugung an, also 3 360 000 Doppelzentner Sulfat, so macht dieses 713 000 Doppelzentner Stickstoff aus.

Von den verschiedenen technischen Verfahren zur Bindung des Luftstickstoffes, die noch später eingehender betrachtet werden, kommen für die gegenwärtigen Betrachtungen nur diejenigen Anlagen in Frage, welche in Deutschland selbst ihren Sitz haben, und von deren Stickstofferzeugung ebenfalls nur ein gewisser Anteil, während eine nicht näher zu bestimmende Menge für technische Zwecke vorbehalten ist. Nur der Kalkstickstoff dürfte fast ausschließlich der Landwirtschaft zur Verfügung stehen, dessen Gesamtstickstoff für Deutschland gegenwärtig auf 150 000 Doppelzentner zu beziffern sein dürfte.

Von den von der Badischen Anilin- und Sodafabrik in Oppau im Jahre 1913 hergestellten 350 000 Doppelzentner Ammonsulfat mögen 300 000 Doppelzentner für Düngezwecke in Rechnung gestellt werden, d. h. 63 636 Doppelzentner Stickstoff.

Der Ausgabe des Bodens an 31 050 000 Doppelzentner Stickstoff stehen somit an Einnahmen gegenüber:

aus Saatgut	862 500	Doppelzentner	N
atmosphärische Niederschläge .	414 000	„	„
durch Knöllchenbakterien . . .	9 500 000	„	„
aus der Jauche	1 275 000	„	„

aus menschlichem Harn . . .	766 500	Doppelzentner	N
feste Exkremente	1 000 000	„	„
gewerbliche Abfälle	1 000 000	„	„
Gasfabriken pp.	713 000	„	„
aus Kalkstickstoff	150 000	„	„
synthet. Ammoniak	63 636	„	„
Summa	15 744 636	Doppelzentner	N

Rechnet man hierzu noch den aus dem Auslande eingeführten Chilesalpeter, welcher nach Vageler[47]) für das Jahr 1905 die Menge von 571 140 Tonnen betragen haben soll, so ergibt sich daraus nochmals rund 1 Millionen Doppelzentner Stickstoff, und der Ausgabe des Bodens von rund 31 000 000 Doppelzentner Stickstoff steht eine Einnahme von 16 750 000 Doppelzentner Stickstoff (abgerundet) gegenüber, das macht 14 250 000 Doppelzentner.

Es bleibt also ein Verlust von 14 250 000 Doppelzentner Stickstoff, für den keine sichtbare Deckung vorhanden ist, und es ergibt sich schon hieraus, daß im Boden noch andere Kräfte tätig sein müssen, welche den Luftstickstoff binden und den Verlust ausgleichen. Gerade diese Frage ist es, welche die bakteriologische Forschung gegenwärtig vorwiegend beschäftigt, und die Tatsache steht wohl, wie früher angedeutet, schon heute fest, daß es Mikroorganismen im Boden gibt, die allein auf sich angewiesen, den Luftstickstoff in aufnahmefähige Form umzuwandeln vermögen, wobei vermutlich der Humus als Energiequelle eine nicht unbedeutende Rolle spielt.

Schon Kühn[48]) hatte die Beobachtung gemacht, daß auf einem längere Jahre hindurch nicht gedüngten Boden, auf dem stets Winterroggen angebaut wurde, der mittlere Ertrag an Körnern in den Jahren 1894—98 denjenigen aus dem Jahre 1879 um 11,6 bezw. 8,5 v. H. übertraf, und hatte daraus die Schlußfolgerung gezogen, daß die hierfür in Rechnung zu stellende Stickstoffmenge dem atmosphärischen Stickstoff entstamme, welcher durch Bodenbakterien in aufnahmefähige Form gebracht sein müsse, eine Annahme, die dadurch eine Stütze fand, daß gleichzeitig durch Krüger und Schneidewind[49]) auf dem Hallenser Versuchsfeld solche Mikroorganismen gefunden wurden.

---

[47]) Die Bindung des atmosphärischen Stickstoffes, S. 20.

[48]) Fühlings Landwirtsch. Ztg. 1901, S. 2.

[49]) Landwirtschaftl. Jahrbücher 1900, Bd. 29, S. 771

Eine andere Beobachtung machte Henry[50]), welcher dürre Blätter von Eichen und Buchen unter entsprechenden Versuchsbedingungen der Luft aussetzte. Nach einem Jahre hatte sich ihr Stickstoffgehalt um 0,4 bezw. 0,78 v. H. vermehrt, was ebenfalls nur auf eine Bakterientätigkeit zurückgeführt werden konnte. Den bestimmten Nachweis dafür, daß im Erdboden Mikroorganismen vorkommen müssen, welche befähigt sind, den Luftstickstoff zu binden, erbrachte zuerst Berthelot[51]). Er fand, daß Ackererde aus dem Untergrund sich mit Stickstoff anreichert, daß diese Eigenschaft aber sofort aufhört, sobald der Boden durch Erhitzen auf über 100 Grad Celsius von Bakterien befreit ist.

Nachdem auf solche Weise die Tatsache an sich festgestellt war, daß im Erdboden niedere Organismen vorkommen, denen die Fähigkeit, den atmosphärischen Stickstoff zu binden, zukommt, gelang es zunächst Winogradsky[52]) eine im Erdboden vorkommende Bakterienart rein zu züchten, welche ausschließlich in Lösungen anorganischer stickstofffreier Salze, bei einem Gehalt von 2—4 v. H. Dextrose, zu wachsen und ihre Körpersubstanz unter Zuhilfenahme des Luftstickstoffes aufzubauen vermag. Er benannte diesen Mikroorganismus „Clostridium Pasteurianum", und gibt an, daß er in einer Lösung von 40 Gramm Dextrose innerhalb 20 Tagen 53,6 Milligramm Stickstoff bindet. Beyerinck[53]), welcher zwei in diese Gruppe gehörende Mikroorganismenarten, den Azotobacter chroococcum und Azotobacter agilis isolierte, nimmt im Gegensatze zu Winogradsky an, daß die Zahl der niederen Organismen, welche den freien Stickstoff assimilieren, eine verhältnismäßig große sein müsse.

Wenn es bis jetzt auch noch nicht gelungen ist, eine erheblichere Anzahl solcher Mikroorganismenarten festzustellen und diese Frage vorläufig noch unbeantwortet ist, so ergibt sich doch aus allem, daß solche den Luftstickstoff bindenden Bakterien sehr allgemein verbreitet sein müssen, und daß die auf solche Weise gebundenen Stickstoffmengen quantitativ die auf bekannte Weise dem Boden zugeführten Mengen weit überragen.

---

[50]) Ref. in Biedermanns Zentralblatt 1898, S. 831.

[51]) Chimie vegetale et agricole, Bd. 1, Paris 1899.

[52]) Compt. rend. 1893, Bd. 116, S. 1385,
„ „ 1894, Bd. 118, S. 353, und
Zentralblatt für Bakt., II, 1902, Bd. 9, S. 43.

[53]) Zentralblatt für Bakt., II, 1902, Bd. 9, S. 3.

Aus unserer vorstehenden Rechnung (S. 31) ergab sich die Ausgabe des Bodens an Stickstoff zu rund 31 Millionen Doppelzentner Stickstoff, denen eine Einnahme von nur 16,75 Millionen Doppelzentner gegenübersteht. Die Differenz von 14,25 Millionen Doppelzentner Stickstoff kann nur durch Mikroorganismentätigkeit gedeckt sein. In der Einnahme von 16,75 Millionen Doppelzentner sind indessen bereits 9½ Millionen Doppelzentner Stickstoff enthalten, welche auf Kosten der Knöllchenbakterien zu buchen sind. Rechnet man diese 9½ Millionen der Differenz von 14,25 Millionen, deren Beschaffung ebenfalls auf Rechnung von Mikroorganismen zu setzen sind, hinzu, so ergeben sich 23,75 Millionen Doppelzentner Stickstoff durch Bakterientätigkeit und 7,25 Millionen Doppelzentner aus zugeführtem Dünger. Also:

Ausgabe des Bodens 31 050 000 Doppelzentner N.

Einnahme

	7 300 000	Doppelzentner N	in Dünger pp.,
	23 750 000	„	durch Bakterien
das macht	31 050 000	Doppelzentner N.	

Der durch die Saat, den Dünger und durch Gewitter in den Boden gelangende Stickstoff beträgt somit noch nicht ⅓ derjenigen Menge, welche durch die Tätigkeit der Mikroorganismen beschafft wird, ohne Kosten und ohne Aufwendung menschlicher Arbeitskraft.

Sind die durch Mikroorganismentätigkeit dem Luftstickstoff entnommenen gebundenen Stickstoffmengen aber bereits so gewaltig, so würde es durch geeignete Pflege und Kultur der in Betracht kommenden Bakterien vermutlich auch möglich sein, die Erträge an Stickstoff noch weiter zu erhöhen, sodaß die durch Düngung in den Boden gelangenden verhältnismäßig geringfügigen Stickstoffmengen überhaupt nicht mehr in Betracht kämen. Hieraus ergibt sich, welche Bedeutng den Bodenbakterien und der Erforschung ihres Wesens und Daseins zukommt.

Wenden wir uns indessen wieder der Betrachtung der technischen Frage der Bindung des Luftstickstoffes zu.

Von dem atmosphärischen Stickstoff gilt dasselbe, was bereits anfangs über die Kohlensäure gesagt wurde. Er ist über die ganze Erdoberfläche gleichmäßig verteilt, aber seine Menge beträgt etwa das 1975 fache derjenigen der Kohlensäure, sodaß hier in der Tat von einer Unerschöpf-

lichkeit für alle Zeiten geredet werden kann. Daß die Nutzbarmachung dieser unendlichen Stickstoffmengen durch Überführung in gebundene Form auch ohne Zutun der bereits erwähnten Bakterienarten möglich ist, zeigt sich nicht allein an der natürlichen Bildung der Salpetersäure durch die elektrische Entladung beim Gewitter. Bald nach dieser Entdeckung Liebigs (l. c.), und nachdem der Ursprung der Salpetersäure im Regenwasser erkannt war, wurde auch von Böttger[54]) die Beobachtung gemacht, daß beim Durchschlagen des elektrischen Funkens durch ein Gemisch aus Stickstoff und Sauerstoff bei Gegenwart von Wasser Salpetersäure erhalten wird, und von Buff und Hofmann[55]) wurde diese Bildungsweise der Salpetersäure bestätigt.

Andererseits wurde von Kolb[56]) nachgewiesen, daß Salpetersäure auch beim Verbrennen von Wasserstoff in atmosphärischer Luft entsteht, und derselbe Vorgang der Salpetersäurebildung wurde von A. W. Hofmann[57]) in der Weise beschrieben, daß derselbe in einem aufrechtstehenden mit Sauerstoffgas gefüllten Kolben Wasserstoff verbrennen ließ. Sobald dann eine gewisse Menge Luft in den Kolben eingedrungen war, zeigten sich rötliche Dämpfe von Untersalpetersäure, welche sich weiter in Salpetersäure umsetzte.

Läßt man dagegen durch ein Gemisch von reinem Stickstoff und Wasserstoff den elektrischen Funken schlagen, bei gänzlicher Abwesenheit von Sauerstoff, oder setzt man das Gemisch der dunklen Entladung des elektrischen Stromes aus, so tritt eine Vereinigung von Stickstoff und Wasserstoff zu Ammoniak ein. Fügt man der Gasmischung aber vorher noch Sauerstoff bezw. ein Knallgasgemisch hinzu, so bildet sich beim Verpuffen salpetrigsaures und salpetersaures Ammon. Dementsprechend bilden sich auch beim Verbrennen von Wasserstoff an der Luft, wie Zöller und Grete[58]) nachgewiesen haben, geringe Mengen von Ammoniumnitrit.

Wissenschaftlich war damit bereits die Frage nach der Möglichkeit der Bindung des atmosphärischen Stickstoffes gelöst, und tatsächlich bildeten die erwähnten Vorgänge auch die Grundlage für weitere Versuche zur technischen Herstellung

---

[54]) Journ. prakt. Chem. 73, S. 494.
[55]) Ann. Chem. Pharm. 113, S. 140.
[56]) Ann. Chem. Pharm. 119, S. 176.
[57]) Berichte der Deutsch. Chem. Gesellschaft 1870, S. 365.
[58]) Berichte der Deutsch. Chem. Gesellschaft 1877, S. 2145.

von Salpetersäure und Ammoniak aus dem Stickstoff der Luft. Es handelte sich darum, die Ergebnisse der wissenschaftlichen Forschung in die Praxis umzusetzen und geeignete Wege zu finden, um die erwähnten chemischen und physikalischen Erscheinungen zu technischen Verfahren auszugestalten, die eine Umwandlung des Luftstickstoffes in gebundene Form in unbeschränkter Menge und zugleich unter Verhältnissen gestattete, die eine wirtschaftliche Verwertung ermöglichten.

Die Schwierigkeiten, die der Lösung dieser Aufgabe entgegenstanden, und die z. T. auch jetzt noch nicht völlig überwunden sind, waren nicht gering, aber in einem Zeitalter der Erfindungen und des Fortschrittes auf allen Gebieten der Wissenschaft und der Technik, konnte auch die Bewältigung der größten Hindernisse nur eine Frage der Zeit sein.

Mag es auch einer langjährigen, mühevollen Arbeit bedurft haben, mag auch ferner noch manche Mühe und angestrengte Geistesarbeit erforderlich sein, um alle Schwierigkeiten zu überwinden und die Verfahren wirtschaftlicher zu gestalten, so darf man doch schon jetzt sagen, daß die erwähnte Aufgabe in der Hauptsache gelöst ist, und daß für alle Zeiten die Gewinnung von stickstoffhaltigen Bodennährstoffen aus dem unendlichen Stickstoffvorrate der Atmosphäre gesichert ist.

Die Bestrebungen, geeignete Verfahren zur Bindung des Luftstickstoffes zu finden, haben sich in verschiedenen Richtungen bewegt, und dementsprechend nehmen drei wesentlich voneinander verschiedene Arten der Stickstoffbindung das Interesse in Anspruch. Verschiedene Faktoren mußten mitwirken, um die Bearbeitung dieser Aufgaben durchführen zu können, und besonders die Etwickelung der elektrotechnischen Wissenschaft am Ende des vorigen Jahrhunderts war eine Vorbedingung für die erfolgreiche Lösung dieser bedeutungsvollen Frage.

Der erste greifbare Erfolg war der der Gewinnung des sogenannten Kalkstickstoffes, oder richtiger des Kalziumzyanamids $CaCN_2$, mit dem seit Anfang des Jahres 1901 von Wagner-Darmstadt und Gerlach-Posen die ersten Düngungsversuche angestellt wurden.

Den Ausgangspunkt dieses Produktes bildet das Kalziumkarbid, welches bereits Davy[59]), der Beschreibung nach zu urteilen, in Händen gehabt hat, und dessen Darstellung und Eigenschaften von Wöhler im Jahre 1862[60]) eingehender

[59]) Ann. Chem. Pharm. 23, S. 144.

[60]) Annal. d. Chem. u. Pharm. 124, S. 220.

beschrieben wurde. Die technische Herstellung des Kalziumkarbids gelang aber erst Moissan[61]), nachdem durch die Vervollkommnung der elektrischen Maschinen die Erzeugung hochgespannter Ströme und die Hervorbringung höchster Hitzegrade ermöglicht war. Schon Fleck[62]) hatte angegeben, daß beim Überleiten eines Gemenges von Stickstoff, Kohlenoxyd und Wasserdampf über rotglühenden Ätzkalk Ammoniak entstehe, eine Angabe, deren Richtigkeit von Weinmann[63]) indessen in Zweifel gezogen wurde.

Nach den heutigen Kenntnissen der Bildung von Kalkstickstoff und des hieraus entstehenden Ammoniaks, und im Hinblick auf die ähnliche Bildungsweise von Ammoniak durch Einwirkung von Stickstoff auf ein stark erhitztes Gemisch von Tonerde und Kohle, kann die Richtigkeit der Angabe von Fleck indessen nicht ohne weiteres in Zweifel gezogen werden. Jedenfalls waren die nach dem Vorgange von Fleck gebildeten Ammoniakmengen sehr gering und die Versuchsbedingungen keineswegs so durchgebildet, um darauf ein technisches Verfahren gründen zu können. Dieses gelang erst durch das Zusammenarbeiten einer größeren Anzahl von Kräften auf dem Gebiete der Chemie und der Elektrotechnik, deren Ergebnis dasjenige Verfahren der Herstellung von Kalkstickstoff war, welches zurzeit in großem Maßstabe in Anwendung kommt.

Durch Überleiten von Stickstoff über stark erhitztes Kalziumkarbid entsteht Kalziumzyanamid, dessen Stickstoff durch Erhitzen des Kalkstickstoffes mit Wasser unter hohem Druck sich zu Ammoniak umsetzt, unter gleichzeitiger Bildung von kohlensaurem Kalk, nach der Gleichung: $CaCN_2 + 3H_2O = 2NH_3 + CaCO_3$. Merkwürdigerweise geht nun aber die Ammoniakbildung aus Kalkstickstoff im Boden von selbst vor sich, so daß besagtes Produkt ohne weiteres als Dünger verwendbar ist. Die Erklärung des Vorganges liegt darin, daß die Ammoniakbildung im Boden nicht unmittelbar vor sich geht, sondern auf dem Umwege über den Harnstoff. Durch die Einwirkung der Bodenfeuchtigkeit und der Humusbestandteile, insbesondere der aus letzteren entwickelten Kohlensäure, wird der Kalkstickstoff, dessen Gehalt an Stickstoff zwischen 17 und 22 % schwankt, in kohlensauren Kalk und freies Zyanamid gespalten, und letzteres geht unter Wasseraufnahme nach der

---

[61]) Compt. rend. 1894, S. 501.

[62]) Bolley's Handbuch der chem. Technologie 1862, II, 2, S. 48.

[63]) Berichte der Deutsch. Chem. Gesellschaft 1875, S. 976.

Gleichung $CN_2H_2 + H_2O = CO\ (NH_2)_2$, zunächst in Harnstoff über, welcher, wie schon früher eingehend erörtert, durch Mikroorganismen erst in Ammoniak, und weiter durch die besonderen Bodenbakterien in Salpetersäure übergeführt wird.

Für die unmittelbare Verwendung des Kalkstickstoffes als Düngemittel ist aber der Umstand zu berücksichtigen, daß das Zyanamid als solches giftige Wirkungen äußert, oder daß sich bei ungenügender Behandlung daraus giftige Zyanverbindungen bilden können. Hieraus erklärt es sich auch, daß die Ergebnisse der ersten Düngungsversuche mit Kalkstickstoff sehr schwankend waren, ein Umstand, der allerdings in letzter Zeit infolge geeigneterer Behandlungsweise auf ein geringes Maß herabgesetzt erscheint. Immerhin liegt in dem unbeständigen Verhalten des Kalkstickstoffes ein Übelstand, den zu beseitigen der Zukunft vorbehalten bleibt.

Nach einem sehr ähnlichen Vorgange, aber auf einfachere Weise, wird die Bindung des Luftstickstoffes durch Anlagerung an Aluminium erreicht, ohne daß erst als Zwischenprodukt das Aluminium-Karbid wirklich hergestellt werden müßte. Das Aluminium-Karbid wurde gleichfalls von Moissan[64]) im elektrischen Schmelzofen aus Tonerde und Kohlenstoff dargestellt, aber schon dieses Karbid erwies sich stets als stickstoffhaltig, ohne Zweifel infolge der gleichzeitigen Einwirkung des Luftstickstoffes während des Schmelzens. Indessen wurde diese Erscheinung derzeit nicht weiter berücksichtigt. Erst neuerdings wurde die weitere Beobachtung gemacht, daß durch gleichzeitige Einwirkung von reinem Stickstoff und Kohle auf Tonerde das Aluminiumnitrit gebildet wird, und zwar bei verhältnismäßig geringen Hitzegraden, bei denen der Kohlenstoff allein keine Reduktion der Tonerde bewirken oder ein Karbid bilden würde.

Nach diesem Vorgange, der den Gegenstand des Verfahrens von Serpek[65]) bildet, wird in ein auf etwa 1900° Cels. erhitztes Gemisch von Kohle und Bauxit, d. h. ein mit Eisenoxyd verunreinigtes Tonerdehydrat $(Al_2O\ [OH]_4)$, Stickstoff eingeblasen, wobei die Bildung von Aluminiumnitrit in wenigen Minuten erfolgt. Durch Erhitzen mit verdünnter Natronlauge, oder besser mit Aluminatlösung, unter Druck, wird das gebildete Nitrid in Tonerde und Ammoniak gespalten und letzteres abdestilliert. Dieses Verfahren dürfte von großer Bedeutung für die Zukunft werden, wenn es

64) Compt. rend. 119, S. 16.

65) D. R. P. 183 702.

gelingt, die Schwierigkeiten zu überwinden, die der technischen Ausführung bis jetzt infolge des Mangels eines geeigneten Materiales zum Füttern der Schmelzöfen entgegenstehen.

Während nun die vorgenannten Verfahren an das Vorhandensein bestimmter Metallkarbide oder die zur Bildung derselben erforderlichen Bestandteile gebunden sind, an welche sich der freie Stickstoff bei hohen Temperaturen anlagert, wird nach dem Verfahren von Haber[66]) Stickstoff und Wasserstoff unter Druck und bei Gegenwart eines nur als Katalysator wirkenden Körpers, wie Uran oder Eisen, bei einer Temperatur von über 500 Grad Celsius unmittelbar zu Ammoniak vereinigt.

Auch dieses Verfahren hat seine Vorgeschichte, die weit in die Vergangenheit zurückreicht.

Die direkte Vereinigung von Wasserstoff und Stickstoff durch den elektrischen Funken oder durch die dunkle Entladung des elektrischen Stromes ist bereits erwähnt worden. Es war aber auch schon durch Regnard[67]), welcher im Gußstahl Ammoniak und daneben freien Stickstoff und Wasserstoff gefunden hatte, die Vermutung ausgesprochen, daß besagtes Ammoniak durch direkte Synthese aus den Elementen entstanden sei. Betrachtet man die Umstände, unter denen die Bildung des im Gußstahl gefundenen Ammoniaks vor sich gegangen sein kann, mit der Ammoniaksynthese nach Haber, so findet sich eine so auffällige Übereinstimmung, daß man der Annahme von Regnard hinsichtlich der Bildungsweise des Ammoniaks eine große Wahrscheinlichkeit zuerkennen muß. Die in der flüssigen Gußstahlmasse eingeschlossenen Gase, Stickstoff und Wasserstoff, stehen bei der hohen Temperatur selbstverständlich unter entsprechend hohem Druck, und als Katalysator wirkt das flüssige Eisen selbst, ebenso wie bei dem Verfahren von Haber, nach welchem ebenfalls als Kontaktmasse fein verteiltes Eisen angegeben ist. Andererseits hat der Vorgang, welcher dem Haberschen Verfahren zugrunde liegt, auch gewisse Berührungspunkte mit den Verfahren der Ammoniakgewinnung der vorigen Gruppe, denn in der Patentbeschreibung erwähnt der Erfinder ausdrücklich, daß als Katalysator auch Urankarbid verwendet werden kann, welches beim Überleiten der Stickstoff-Wasserstoffmischung zu einem feinen urannitridhaltigen Pulver zerfällt, welches ganz wesentlich wirksamer ist als reines Uran. Es könnte hiernach fast

---

[66]) D. R. P. 229 126 vom Jahre 1909.

[67]) Compt. rend. 84, S. 260.

erscheinen, als ob nicht das Metall als solches, sondern das Metallkarbid der Katalysator sei, an dem sich zunächst der Stickstoff anlagert, während die gebildete Stickstoffverbindung des Metallkarbids sofort unter der Einwirkung des Wasserstoffs in Ammoniak und Metallkarbid zerfällt, welch letzteres sich dann sofort wieder mit Stickstoff verbindet und wieder zerfällt. Jedenfalls scheint der Vorgang dieser Ammoniaksynthese in naher Beziehung zu dem Karbid zu stehen.

Diesem Verfahren von Haber scheint übrigens die größte Bedeutung von allen bisher erwähnten Bindungsarten des Stickstoffes zuzukommen, besonders, wenn dasselbe mit dem noch zu erörternden sogenannten Luftverbrennungsverfahren verbunden, und der Stickstoff in Form von Ammoniumnitrat gewonnen wird. Bis jetzt wird das Ammoniak nach diesem Verfahren als Ammoniumsulfat gewonnen, von welchem die Badische Anilin- und Sodafabrik, die Besitzerin des Haberschen Patentes, in ihrer Anlage in Oppau für das Jahr 1916 angeblich 300 000 Tonnen herzustellen hofft, also die doppelte Menge dessen, welche alle Kokereien und Gasanstalten zusammen zu liefern vermögen.

Nach allen bis jetzt erörterten Verfahren wird der Stickstoff in Form von Ammoniak erhalten, welches nach den Versuchen von Wagner nicht ganz den Düngewert besitzt, wie der Nitratstickstoff, der ohne weiteres assimiliert wird. Es liegt auch die Gefahr vor, daß das Ammoniak bei seiner erst im Boden zu bewirkenden Nitrifikation nicht völlig in Salpetersäure übergeführt wird, und daß ein Teil des Stickstoffes dabei verloren geht. Wenn daher auch im allgemeinen der Salpeterstickstoff als Pflanzennährstoff dem Ammoniak vorzuziehen ist, so hat doch auch letzteres unter besonderen Verhältnissen seine Vorzüge und würde bei bestimmten Vorgängen der Eiweißsynthese nicht durch Salpetersäure ersetzt werden können. Die Bedeutung des Stickstoffes liegt ja darin, daß er durch die Pflanze in das zur Ernährung von Mensch und Tier notwendige Eiweiß umgewandelt wird, wozu der Ackerboden erforderlich ist. Wenn es also möglich wäre, Eiweiß in einer genußfähigen Form auf anderem Wege, etwa unter Zuhilfenahme von Mikroorganismen ohne Inanspruchnahme des Ackerbodens hervorzubringen, so würde dieses von nicht zu unterschätzender Bedeutung sein, denn Mikroorganismen bedürfen zu ihrem Wachstum im allgemeinen nicht nur nicht des Ackerbodens, sie sind dabei auch nicht an eine bestimmte Jahreszeit gebunden, und schließlich geht das Wachstum der Mikroorganismen und die damit

verbundene Eiweißsynthese mit einer Schnelligkeit vor sich, die in keinem Verhältnisse zur Schnelligkeit des Pflanzenwachstums steht.

Während aber die Pflanzen auf die Salpetersäure angewiesen sind, und das Ammoniak nur mittelbar nach vorhergegangener Oxydation seitens der Bakterien zu assimilieren vermögen, können umgekehrt die Mikroorganismen vielfach wohl von Ammoniak, nicht aber von Salpetersäure leben.

Wäre daher die Züchtung geeigneter Mikroorganismen lediglich unter Heranziehung des Ammoniaks als Stickstoffnahrung in großem Maße durchzuführen, so würde dem Ammoniak eine doppelte Bedeutung zukommen, einmal als Pflanzennährstoff durch vorhergehende Nitrifikation seitens der Bodenbakterien, und weiter unmittelbar als Bakteriennährstoff zur Eiweißbildung ohne Inanspruchnahme des Ackerbodens.

Daß viele Mikroorganismen, und zwar nicht nur die mehrfach erwähnten Bodenbakterien, sondern auch viele andere Arten von Ammoniak zu leben vermögen, ist hinlänglich bekannt, und ein umfangreiches Beobachtungsmaterial liegt auch hierüber vor. Die ersten quantitativen Versuche über Ammoniakassimilation seitens der Bakterien wurden von Nencki und Schaffer[68]) angestellt und seitdem hat sich die Kenntnis solcher Mikroorganismen ständig erweitert, sodaß es kaum noch möglich erscheint, in gedrängter Übersicht alle die einzelnen Arten anzuführen, welche die Fähigkeit der Ammoniakassimilation besitzen. Beteiligt sind daran Schimmelpilze und Mykodermaarten, wie von letzteren besonders Schulz[69]) nachgewiesen hat. Auch von dem monotrophen Milchsäurebazillus hat Timpe[70]) festgestellt, daß er von Ammoniaksalzen in Gegenwart von Milchzuckerlösung leben und die ihm eigentümliche Milchsäuregärung durchführen kann. Die exklusive Lebensart dieses Pilzes bezieht sich demnach nicht auf den stickstoffhaltigen Nährstoff, sondern auf die besondere Kohlehydratquelle. Dieselbe Erscheinung zeigen auch die Hefepilze, welche von Pasteur[71]) auf ihre Lebensbedingungen hin untersucht und als ammoniakassimilierende Organismen erkannt wurden.

---

[68]) Journ. f. prakt. Chemie (N. F.) 20, S. 443 ff.

[69]) Annalen der Oknologie 7, S. 115.

[70]) Archiv f. Hygiene 18, S. 9.

[71]) Compt. rend. 48, S. 617.

Man darf demnach wohl behaupten, daß an Mikroorganismen, die von Ammoniak leben können und daraus das ihnen eigentümliche Proteïn aufbauen, kein Mangel ist, nur war bisher nicht daran zu denken, aus dem bunten Gemisch von stinkenden Fäulnisbakterien ein zu Ernährungszwecken taugliches Eiweiß zu gewinnen, oder dasselbe aus Milchsäurebakterien oder Hefe in namhafteren Mengen technisch herzustellen.

In letzter Zeit soll es ja nun im Institut für Gärungsgewerbe in Berlin gelungen sein, eine Massenzüchtung von Hefe mit Ammonsalzen durchzuführen und das gebildete Hefeeiweiß zu Futterzwecken nutzbar zu machen. Über die Erfolge ist bis jetzt indessen nichts weiter bekannt geworden, und die hochgespannten Erwartungen, die an diese angeblich neue Eiweißquelle geknüpft waren, scheinen wohl inzwischen auf ein sehr bescheidenes Maß herabgesunken zu sein. Zur technischen Durchführbarkeit des Verfahrens ist eben seine Rentabilität Vorbedingung, und es ist sehr fraglich, ob der Gewinn an Eiweiß, von dem noch nicht einmal feststeht, ob es bezüglich seines Nährwertes dem Tier- und Pflanzeneiweiß gleichwertig ist, das Opfer an Kohlehydraten aufwiegt, welches stets mit dem Hefewachstum verbunden ist.

Von volkswirtschaftlicher Bedeutung könnte die Erzeugung von Proteïn vermutlich nur dann werden, wenn dafür solche Ammoniak assimilierenden Mikroorganismen gefunden würden, die nicht auf Kohlehydrate angewiesen sind, welche für Mensch und Tier selbst als Nahrungsmittel unentbehrlich sind, sondern welche zugleich auch ihren Kohlenstoffbedarf durch einfachere Kohlenstoffverbindungen zu decken vermögen. Daß es solche Mikroorganismen gibt, beweist ja die Lebensweise der Boden- und Salpeterbakterien, welche als Stickstoffquelle nur Ammoniak erfordern und den Kohlenstoff ausschließlich der Kohlensäure der Luft entnehmen. Wenn diese Aufgabe auch bis jetzt noch nicht ganz einwandfrei gelöst sein sollte, so ist doch zu hoffen, daß entgegenstehende Schwierigkeiten auch hier noch überwunden werden, und in diesem Falle würde das Ammoniak im Kreislaufe des Stickstoffes den salpetersauren Salzen mehr als gleichwertig sein.

Die Bemühungen der Neuzeit, den Luftstickstoff zu binden, sind indessen auch noch nach anderer Richtung hin von Erfolg gewesen. Es ist nicht nur gelungen, nach den bereits besprochenen Verfahren Ammoniak herzustellen, sondern es haben auch die gleichzeitigen Versuche der sogenannten Stick-

stoffverbrennung zu einem Ergebnis geführt, welches dem Aufwande an mühevoller und restloser Geistesarbeit entspricht.

Für die Gewinnung der Salpetersäure kommen zwei Verfahren in Betracht, welche einer Anwendung im Großbetriebe fähig sind, die aber beide auf derselben Grundlage beruhen. Es ist das im Besitze der Badischen Anilin- und Sodafabrik befindliche Verfahren von Schönherr und dasjenige von Birkeland und Eyde. Nach beiden Verfahren wird das Gemisch von Stickstoff und Sauerstoff, d. h. die Bestandteile der atmosphärischen Luft, durch den elektrischen Flammenbogen vereinigt zu Stickoxyd, welches nach dem Verlassen des Lichtbogens möglichst rasch gekühlt und, nachdem es auf seinem Wege durch den Luftsauerstoff weiter oxydiert ist, von herabrieselndem Wasser aufgenommen wird. Es handelt sich somit um eine Anwendung der schon früh bekannten Reaktion, welche in ihrem Verlauf besonders von Böttger[72]) eingehender beschrieben wurde, wonach beim Durchschlagen des elektrischen Funkens durch ein Gemisch von Stickstoff und Sauerstoff sich Untersalpetersäure bildet, welche beim Zusammentreffen mit Wasser nach der Gleichung: $3\,NO_2 + H_2O = 2\,HNO_3 + NO$ zu Salpetersäure und Stickoxyd umgesetzt wird. Das gebildete Stickoxyd (NO) aber geht durch den Sauerstoff der Luft sogleich wieder in salpetrige Säure und Untersalpetersäure über, welche sich mit Wasser in der angegebenen Weise weiter zersetzen, bis schließlich das ganze Reaktionsprodukt in Salpetersäure umgewandelt ist.

Das Auftreten roter Dämpfe bei diesem Vorgange beweist natürlich nicht die unmittelbare Bildung von Untersalpetersäure beim Durchschlagen des Funkens, denn das Stickoxyd (NO) geht sofort bei der Berührung mit dem Luftsauerstoff, wozu dasselbe ja sogleich Gelegenheit hat, in rote Untersalpetersäuredämpfe über. Tatsächlich bildet sich erst Stickoxyd, welches in erwähnter Weise bei Gegenwart von Luft und Wasser zu Salpetersäure wird.

Die auf solche Weise gebildeten Säuremengen sind natürlich außerordentlich gering, und um diesen Vorgang zu einem technisch brauchbaren Verfahren zu gestalten, bedurfte es nicht des Funkens, sondern des ausgedehnten elektrischen Flammenbogens, dessen Erzeugung erst möglich war, nachdem unsere elektrischen Maschinen auf das höchste Maß der Vollkommenheit gebracht worden waren.

---

[72]) l. c. Journ. prakt. Chem. 73, S. 494.

Erst mit diesen Hilfsmitteln und nach Überwindung vieler weiterer Hindernisse konnten die Verfahren so weit ausgebaut werden, daß ein technischer Großbetrieb danach möglich war. Es handelte sich nicht nur darum, eine der aufgewendeten Energie entsprechende hohe Ausbeute an Stickoxyd zu erzielen, sondern dieses auch in möglichst hoher Konzentration zu gewinnen.

Große Schwierigkeiten bietet auch die Stromzuführung zum Ofen infolge der Inkonstanz des Lichtbogens[73]), und es mag noch manches zu tun übrig bleiben, um die Verfahren weiter zu verbessern und wirtschaftlicher zu gestalten. In der Hauptsache ist auch hier das erstrebte Ziel erreicht, wenn auch vorläufig nur für solche Gegenden, in denen die zur Erzeugung der elektrischen Ströme erforderlichen Kräfte billig zu haben sind.

Diese beschränkte Verwertbarkeit hat ihren Grund darin, daß nach dem Verfahren von Schönherr das Reaktionsprodukt nur 1½ v. H. Stickoxyd, nach dem von Birkeland-Eyde sogar nur 1 v. H. Stickoxyd enthält.

Unter solchen Umständen beträgt die Menge des gebundenen Stickstoffes, welche für das Kilowattjahr hergestellt wird, etwa 140 Kilo, welche mit 170 Mark zu bewerten sind. Würde die zur Herstellung dieser Menge gebundenen Stickstoffes erforderliche Energie aber durch Kohle erzeugt, so würde das Kilowattjahr bei billigsten Kohlepreisen sich auf etwa 210 Mark berechnen. Bei der angegebenen Ausbeute an Stickoxyd ist daher an eine technische Verwertung der Verfahren zur Verbrennung des Luftstickstoffes nur zu denken, wenn billigere Energiequellen als die Kohle zur Verfügung stehen, und als solche kann nur die Wasserkraft in Frage kommen.

Wir waren durch unsere Betrachtungen zu dem Ergebnis gelangt, daß die unermeßliche Quelle der Atmosphäre für alle Zeiten nicht nur die Verluste ausgleichen werde, die dem Stickstoffkreislaufe infolge unserer Kulturverhältnisse zugefügt werden, sondern daß sie auch darüber hinaus allen Mehranforderungen Genüge leisten werde, die durch die wachsende Bevölkerungszahl und durch die Kulturfortschritte bedingt sind. Aber hierfür kommt noch ein Faktor in Betracht, der mit der Wandelbarkeit der Materie eng verknüpft ist, und das ist eben die Energie.

---

[73]) Vergl. Zenneck: Die Verwertung des Luftstickstoffes mit Hilfe des elektrischen Flammenbogens. Physikal. Zeitschrift 11, S. 1228 ff.

Die Überführung des Luftstickstoffes in Salpetersäure, zum Teil aber auch in Ammoniak, wird durch den elektrischen Flammenbogen bewirkt, der allein die für die Durchführung des Prozesses erforderlichen Hitzegrade liefert, aber die elektrische Energie ist nicht ohne weiteres als solche in größeren Mengen vorhanden, sondern muß erst aus anderen Energieformen umgewandelt werden. Die Überführung des Luftstickstoffes in gebundene Form ist also an den Energievorrat der Natur gebunden, und es ist noch zu untersuchen, ob letzterer stets in geeigneter Form ebenfalls in uerschöpflicher Menge zur Verfügung steht.

Wie schon gesagt, ist der Kreislauf des Stickstoffes, wie der aller Materie, an den Kreislauf der Energie gebunden, und der Urquell aller Energie ist die Sonne. Nur durch die Sonnenwärme wird die grüne chlorophyllführende Pflanze befähigt, die Kohlensäure der Atmosphäre zu verarbeiten, und aus deren Bestandteilen im Verein mit den aus dem Boden entnommenen Stoffen die unendliche Anzahl der verschiedenen organischen Verbindungen aufzubauen, die in den Pflanzen anzutreffen sind, und in denen die aufgewandte Energie aufgespeichert ist. Die Hauptmenge des Pflanzenkörpers, in gewissem Sinne das Skelett desselben, ist Zellulose, durch deren Verbrennung an der Luft die aufgespeicherte Energie in Form von Wärme wieder frei wird. Steinkohlen und Braunkohlen sind die versteinerten Produkte einer in früheren Erdperioden untergegangenen Pflanzenvegetation, und deren Verbrennungswärme somit die vor Jahrtausenden darin aufgespeicherte Sonnenwärme. Die durch die Verbrennung von Holz und Kohle in Freiheit gesetzte Wärme muß zunächst in mechanische Energie umgesetzt werden durch Verdampfung des Wassers, und erst die lebendige Kraft der gespannten Wasserdämpfe wird vermittelst der Dynamomaschinen in elektrische Energie umgewandelt.

Die Energiequelle, welche uns in der Sonnenwärme zur Verfügung steht, ist zwar unerschöpflich wie der Stickstoffvorrat der Atmosphäre, aber es ist ein langer Weg, den sie zurückzulegen hat, um auf diese Weise in die zur Erzeugung des elektrischen Flammenbogens geeignete Form zu gelangen, und viel geht auf diesem Wege verloren, sodaß nur ein geringer Teil des Wärmewertes der Kohle zur Geltung kommt. Abgesehen aber davon, daß die Kohle, wenn auch vielleicht erst in sehr späten Zeiten, doch auch einmal ein Ende nimmt, haben Holz und Kohle einen zu hohen wirtschaftlichen Wert, als daß bei dem geringen Nutzeffekt daran zu denken

wäre, durch Heizung mit Kohle die zur Überführung des Luftstickstoffes in Salpetersäure erforderliche elektrische Energie zu bilden. Eine direkte Überführung der Sonnenwärme in mechanische Energie ist aber unmöglich, weil erstere, wenn auch unendlich groß und unerschöpflich, doch zu verdünnt ist, um ohne weiteres hochgespannte Wasserdämpfe zu erzeugen; dagegen hat die Natur vorsorgend selbst einen Kreislauf der Sonnenenergie geschaffen, in dem die letztere in mechanische Energie verwandelt wird.

Die Sonne ist unablässig tätig, das Wasser der Meere und der Erdoberfläche in Dampf zu verwandeln und durch die verschiedene Erwärmung der Atmosphäre Luftströmungen zu erzeugen, durch welche die gebildeten Wasserdämpfe fortgeführt werden. Die Wasserdämpfe, welche durch Abkühlung zu Regen verdichtet, an hochgelegenen Stellen der Erdoberfläche niederfallen, speisen Quellen und Flüsse, deren Wasser unablässig talwärts dem Meere zuströmt, um von dort den Kreislauf aufs neue zu beginnen.

So wird die Wärme der Sonne in mechanische Energie verwandelt, und die lebendige Kraft der strömenden Gewässer, welche ebenso unerschöpflich ist, wie die Wärmequelle, der sie entspringt, ist billig genug, um sie zur Erzeugung der für die Bindung des Stickstoffes erforderlichen elektrischen Energie zur Verwendung zu bringen. Wie der Kreislauf des Stickstoffes aus dem unerschöpflichen Vorrate der Atmosphäre, so schöpft der Kreislauf der Energie aus dem unermeßlichen Vorrate der Sonnenwärme.

Diese Energie ist nun allerdings nicht ganz gleichmäßig verteilt, sondern sie hängt wesentlich ab von der Bodenbeschaffenheit des Landes und zugleich von der Wassermenge, welche in dem letzteren zur Geltung kommt. Die Arbeit, welche ein fließendes Gewässer zu leisten vermag, ist gleich dem Produkt aus der Wassermenge und dem Gefälle. Ist das Gefälle sehr klein, so fließt das Gewässer sehr träge oder gar nicht, und seine lebendige Kraft ist ebenfalls sehr gering, mag die Wassermenge an sich auch noch so groß sein. Ist umgekehrt die Menge des Wassers sehr gering, so ist die lebendige Kraft ebenfalls sehr gering, wenn auch die Höhe, von der das Wasser herabfällt, noch so groß ist. Wassermenge und Fallhöhe oder Gefälle müssen beide hinreichend groß sein, und daher wird ein wasserreiches, stark zerklüftetes Gelände, in welchem die Gewässer auf kurze Strecken von erheblichen Höhen herabstürzen, wesentlich bevorzugt sein. Dieses ist in ausgedehntem Maße in Norwegen der Fall, wo große Wasser-

massen ununterbrochen und meist noch unbenutzt in die Tiefe stürzen, und aus diesem Grunde haben sich auch die erwähnten Anlagen zur Oxydation des Luftstickstoffes, obgleich alle diese Erfindungen deutschem Geiste entstammen, in Norwegen niedergelassen.

Allerdings stehen auch uns Wasserkräfte zur Verfügung, aber in erheblich geringerem Maße, und zudem sind sie entsprechend unserer ausgedehnten Industrie, zum Teil wenigstens bereits für andere Zwecke in Benutzung genommen.

Sollte es indessen gelingen, die betreffenden Verfahren weiter zu vervollkommnen, sodaß die Ausbeute an Nitratstickstoff ein Mehrfaches der jetzigen erreicht, so würden die erwähnten Schwierigkeiten auch für weniger mit Wasserkraft gesegnete Länder fortfallen, und Salpeter auch für diese in jeder Menge aus dem Luftstickstoff zu beschaffen sein, wie es für den Ammoniakstickstoff schon jetzt zutreffend ist. Freilich ist für die Herstellung der hierfür in Betracht kommenden Zwischenprodukte zum Teil ebenfalls elektrische Kraft erforderlich, aber das Gemisch aus Kohle und Kalk wird nicht nur zu 1 v. H., sondern in seiner Gesamtheit zu Kalziumkarbid verbunden, und die Anlagerung von Stickstoff an letzteres erfolgt sogar unter Wärmeentwickelung, sodaß der Kraftverbrauch zur Erzeugung des Kalkstickstoffes nur ein verhältnismäßig geringer ist, und ähnlich verhält es sich mit der Bildung von Ammoniumnitrit und des daraus gewonnenen Ammoniaks.

Während, wie schon erwähnt, für das Kilowattjahr an Salpeterstickstoff nur 140 kg gewonnen werden können, kommen auf denselben Kraftverbrauch nach dem Aluminiumnitrit-Verfahren 5000 kg Ammoniakstickstoff, und noch geringer ist der Kraftverbrauch für die Ammoniaksynthese nach Haber. Es wird also auch bei uns für die Verwertung des Luftstickstoffes stets genügend Energie vorhanden sein.

Schlußwort

Solange die Sonne scheint und die Ströme dem Meere zufließen, solange der Erde ihre Atmosphäre erhalten bleibt, wird es möglich sein, dem Boden den nötigen Stickstoffdünger stets aufs neue und in solchen Mengen zuzuführen, die auch den höchsten Anforderungen des Ackerbodens Genüge leisten.

Damit ist nun freilich nicht gesagt, daß die Ertragsfähigkeit eines Bodens lediglich durch Zufuhr von Stickstoffdünger ins Ungemessene gesteigert werden könne. Das Pflanzenwachstum ist nicht nur abhängig von der Menge der Pflanzennährstoffe, die zur Verfügung stehen, sondern in sehr hohem Maße auch von dem Energievorrat, ohne welchen ein Pflanzen-

wachstum undenkbar ist, und die Quelle dieser Energie, die Sonnenwärme, ist über die Erdoberfläche nicht ganz gleichmäßig verteilt.

Sinkt die Wärmezufuhr und damit die Temperatur unter ein bestimmtes Maß herab, so hört jedes Pflanzenwachstum auf; es ist unter sonst gleichen Verhältnissen um so üppiger, je wärmer das Klima ist; wird aber ein bestimmtes Wärmemaß überschritten, so nimmt das Wachstum ebenfalls wieder ab, und würde oberhalb einer bestimmten Temperaturgrenze wieder gänzlich aufhören.

Dem Pflanzenwachstum ist eine obere und eine untere Temperaturgrenze gesetzt und innerhalb dieser Grenzen liegt ein Optimum. Ist die zum Pflanzenwachstum erforderliche Wärmeenergie nicht in genügendem Maße vorhanden, so würde keine noch so große Zufuhr von Pflanzennährstoffen ein Wachstum hervorzubringen vermögen.

Es wird daher der Ertragsfähigkeit des Ackerbodens eine durch die klimatischen Verhältnisse bedingte obere Grenze gesetzt, oberhalb welcher auch eine weitere Stickstoffzufuhr nutzlos wäre.

Den substanziellen Pflanzennährstoffen gesellt sich die Energie, und wenn früher von einem Nährstoffverhältnis die Rede war, so darf bei ihm die Wärmeenergie nicht außer Acht gelassen werden.

Der Weg bis zur Erreichung der unserem Klima entsprechenden oberen Grenzen der Leistungsfähigkeit des Ackerbodens ist aber noch weit und bei zweckmäßiger Benutzung der gebotenen Mittel wird die Ertragsfähigkeit des Bodens noch wesentlich gesteigert werden können.

Die Aufgabe der Landwirtschaft wird es sein, die durch die klimatischen Verhältnisse gesetzten Grenzen der höchsten Leistungsfähigkeit des Bodens zu finden, um durch eine Ausnützung aller verfügbaren Kräfte das erstrebte Ziel, die vollste wirtschaftliche Unabhängigkeit vom Auslande, zu erreichen.

Inhalt.